

BRENDA SILVA DOS REIS

**AVALIAÇÃO DO SEQUESTRO DE CARBONO NOS MANGUEZAIS DA BAIXADA
SANTISTA EM DIFERENTES CONTEXTOS DE CONSERVAÇÃO**

São Vicente

2025

BRENDA SILVA DOS REIS

**AVALIAÇÃO DO SEQUESTRO DE CARBONO NOS MANGUEZAIS DA BAIXADA
SANTISTA EM DIFERENTES CONTEXTOS DE CONSERVAÇÃO**

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Débora Martins de Freitas
Co-Orientadora: Dr^ª. Micheli Duarte de Paula Costa

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade Estadual Paulista “Júlio de
Mesquita Filho” - UNESP – Instituto de
Biociências, Campus do Litoral Paulista
(IB/CLP), como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Ciências Biológicas,
modalidade Biologia Marinha.

São Vicente

2025

R375a

Reis, Brenda Silva dos

Avaliação do sequestro de carbono nos manguezais da Baixada Santista em diferentes contextos de conservação / Brenda Silva dos Reis. -- São Vicente, 2025

44 p. : tabs., mapas

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Ciências Biológicas) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Biociências, São Vicente

Orientadora: Débora Martins de Freitas

Coorientadora: Micheli Duarte de Paula Costa

1. Manguezal. 2. Carbono Azul. 3. Unidades de Conservação. 4. Adaptação Costeira. 5. Modelagem de Carbono. I. Título.

AGRADECIMENTOS

À Profª Drª Débora Martins de Freitas pela orientação e apoio ao projeto, sempre contribuindo com materiais de estudo e contatos que foram essenciais durante minha formação acadêmica.

À pesquisadora Dra. Micheli Duarte de Paula Costa pela disponibilidade como coorientadora. Obrigada pela dedicação de seu tempo, pela paciência, por acreditar no projeto e pelo apoio contínuo dedicado a me auxiliar na gestão deste trabalho.

À UNESP, pela formação de qualidade e pelo contato com professores e outros profissionais extremamente competentes.

À FAPESP (Processo 2024/22893-1) pelo apoio financeiro que possibilitou não apenas a minha permanência na Universidade, mas o pleno desenvolvimento desse projeto.

Por fim, à minha mãe, Adriana, por nunca duvidar da minha capacidade de atingir esses sonhos que mirei tão alto em conceber, e a todo o coletivo Akilombar que formou minha rede de apoio me permitindo trilhar esse caminho árduo com amor. Eu sou porque nós somos.

RESUMO

Os manguezais da Baixada Santista representam importantes reservatórios de carbono azul, mas estão submetidos a pressões crescentes decorrentes da urbanização, industrialização e mudanças no uso do solo. Este estudo teve como objetivo avaliar de que forma a presença de Unidades de Conservação (UCs) influencia os estoques e o sequestro de carbono em manguezais, comparando áreas protegidas e não protegidas entre 1985 e 2021. Para isso, utilizou-se o modelo InVEST Coastal Blue Carbon, alimentado com séries históricas de uso e cobertura da terra processadas em ambiente QGIS. Paralelamente, testes estatísticos e Modelos Lineares Mistos Generalizados foram empregados para identificar diferenças significativas entre os dois grupos de manejo. Os resultados demonstram que manguezais localizados dentro de UCs apresentam estoques de carbono do solo, em média, 12% superiores aos de áreas não protegidas, além de exibirem maior estabilidade temporal nas taxas de sequestro. A continuidade estrutural do ecossistema se mostrou determinante: municípios como Cananéia, onde há amplos trechos contínuos de manguezal, apresentaram os maiores estoques e desempenhos mais consistentes. Em contraste, regiões fortemente urbanizadas, como Santos e São Vicente, revelaram maior variabilidade interanual, redução relativa da eficiência de acúmulo e maior suscetibilidade à fragmentação, apesar de ainda apresentarem valores absolutos expressivos que evidenciam o potencial do ecossistema quando adequadamente protegido. A simulação de cenários futuros indicou que a expansão das UCs pode ampliar significativamente o sequestro de carbono até 2050, especialmente quando associada a políticas de restauração e recuperação de áreas degradadas. Por outro lado, a redução da proteção tende a comprometer a estabilidade dos estoques, intensificar processos de degradação e aumentar a vulnerabilidade ecológica da região. Os resultados reforçam que a proteção formal por meio de UCs desempenha papel decisivo na manutenção da função climática, ecológica e socioeconômica dos manguezais, contribuindo diretamente para metas da Década do Oceano, do Acordo de Paris e dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

Palavras-chave: carbono azul; manguezal; Unidades de Conservação; InVEST; Baixada Santista.

ABSTRACT

The mangroves of the Baixada Santista represent important blue carbon reservoirs but are subject to increasing pressures resulting from urbanization, industrialization, and land-use changes. This study aimed to assess how the presence of Protected Areas (PAs) influences carbon stocks and sequestration in mangroves, comparing protected and unprotected areas between 1985 and 2021. To this end, we used the InVEST Coastal Blue Carbon model, fed with historical land-use and land-cover series processed in a QGIS environment. In parallel, statistical tests and Generalized Linear Mixed Models were employed to identify significant differences between the two management groups. The results show that mangroves located within PAs have soil carbon stocks that are, on average, 12% higher than those of unprotected areas, and they also exhibit greater temporal stability in sequestration rates. The structural continuity of the ecosystem proved decisive: municipalities such as Cananéia, which have large continuous stretches of mangrove, showed the highest stocks and more consistent performance. In contrast, highly urbanized regions such as Santos and São Vicente revealed greater interannual variability, a relative reduction in accumulation efficiency, and higher susceptibility to fragmentation, despite still presenting expressive absolute values that highlight the ecosystem's potential when adequately protected. Future scenario simulations indicated that expanding PAs can significantly increase carbon sequestration by 2050, especially when associated with restoration and recovery policies for degraded areas. On the other hand, reducing protection tends to compromise stock stability, intensify degradation processes, and increase the ecological vulnerability of the region. The results reinforce that formal protection through PAs plays a decisive role in maintaining the climatic, ecological, and socioeconomic functions of mangroves, contributing directly to the goals of the Ocean Decade, the Paris Agreement, and the Sustainable Development Goals.

Keywords: blue carbon; mangrove; Protected Areas; InVEST; Baixada Santista.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 . O Carbono Azul e a Mitigação Climática Global	1
1.2 Políticas Internacionais e o Contexto do Carbono Azul.....	1
1.3 . Importância Ecológica e Socioeconômica dos Manguezais	2
1.4 Marco Legal e Políticas de Conservação no Brasil.....	3
1.5 Manguezais no Estado de São Paulo e na Baixada Santista.....	4
1.6 Lacunas de Conhecimento e Justificativa do Estudo	5
2. OBJETIVOS	6
2.1 Objetivo Geral	6
2.2 Objetivos Específicos	6
3. MATERIAIS E MÉTODOS	6
3.1 Área de Estudo	7
3.2 Obtenção e processamento dos dados	8
3.3 Modelagem Estatística das Diferenças de Estoque de Carbono Azul em Manguezais Protegidos e Não Protegidos.....	9
3.4 Modelando a dinâmica de carbono azul em manguezais em diferentes cenários de conservação	10
3.5 Análise e interpretação dos resultados.....	16
4. RESULTADOS.....	17
4.1 Modelagem Estatística das Diferenças de Estoque de Carbono Azul em Manguezais Protegidos e Não Protegidos	17
4.2 Modelando a dinâmica de carbono azul em manguezais em diferentes cenários de conservação	18
4.2.4. Análises de sensibilidade.....	25
5. DISCUSSÃO	25
6. CONCLUSÃO	28
7. REFERÊNCIAS.....	30
APÊNDICE.....	34

1. INTRODUÇÃO

1.1 O Carbono Azul e a Mitigação Climática Global

O carbono azul (Nellemann et al., 2009) refere-se ao dióxido de carbono (CO₂) atmosférico capturado e estocado por ecossistemas costeiros e marinhos, como manguezais, marismas e pradarias marinhas, que desempenham papel crucial na regulação climática global. Esses ambientes, que são comumente chamados de ecossistemas de carbono azul (ECAs), tem potencial de funcionar como sumidouros altamente quando em saúde plena e são capazes de armazenar mais carbono por unidade de área do que a maioria dos ecossistemas terrestres. (Donato et al., 2011; McLeod et al., 2011; Howard et al., 2017).

No caso dos manguezais, sua elevada produtividade primária, associada à deposição de matéria orgânica em condições de baixa oxigenação, favorece o acúmulo de carbono por escalas de tempo milenares (Bouillon et al., 2008; Rovai, 2021). A decomposição restrita em sedimentos anóxicos e a influência constante das marés conferem alta estabilidade ao carbono estocado, o que torna esses ecossistemas elementos-chave na mitigação das mudanças climáticas (Friess et al., 2020). Estudos indicam que os manguezais podem reter até 40 vezes mais carbono do que florestas tropicais de igual extensão, com valores médios de 800 a 1200 tC ha⁻¹ (Donato et al., 2011; Kauffman et al., 2020). Essa eficiência resulta tanto da biomassa aérea e subterrânea quanto da grande quantidade de matéria orgânica sedimentar preservada em profundidade, proveniente de material autóctone e alóctone (Alongi, 2008).

Em contraste, a degradação ou conversão dos ECAs acarreta a liberação significativa de CO₂ e CH₄, revertendo sua função de sumidouro e transformando-os em fontes líquidas de gases de efeito estufa (Lovelock et al., 2017; O'Connor et al., 2019). Estima-se que as perdas globais desses ecossistemas por ações antrópicas liberem entre 0,15 e 1,02 Gt CO₂ ano⁻¹ (Himes-Cornell et al., 2018), representando contribuição relevante ao orçamento global de carbono. Além das pressões antrópicas, as mudanças climáticas impõem ameaças adicionais aos ECAs, como o aumento do nível do mar, a intensificação de eventos extremos e alterações nos regimes de salinidade e temperatura. A conservação e a restauração desses ecossistemas são, portanto, essenciais não apenas para mitigar as emissões, mas também para fortalecer a adaptação costeira frente às mudanças globais (Lovelock, 2020., McCreddie, 2021).

Assim, a conservação e restauração desses ecossistemas têm sido reconhecidas como estratégias centrais de mitigação climática e de alcance das metas do Acordo de Paris (Hoegh-Guldberg et al., 2019; Gattuso et al., 2018). Além de seu papel no sequestro de carbono, os manguezais também contribuem para a Adaptação Baseada em Ecossistemas (AbE), promovendo co-benefícios como proteção costeira, segurança alimentar e manutenção de meios de vida (Taillardat et al., 2018; Bertram et al., 2021).

1.2 Políticas Internacionais e o Contexto do Carbono Azul

No contexto das políticas ambientais internacionais, a conservação e a restauração dos ECAs passaram a integrar as principais agendas multilaterais voltadas à mitigação das mudanças climáticas. Esses ecossistemas são reconhecidos pela Convenção das Nações Unidas sobre

Mudança do Clima (UNFCCC) e pelos relatórios do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2019) como aliados estratégicos para atingir as metas do Acordo de Paris e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente os ODS 13 (Ação Climática) e 14 (Vida na Água).

A Década da Ciência Oceânica para o Desenvolvimento Sustentável (2021–2030) reforça a urgência de ampliar estratégias baseadas na natureza, destacando a importância da resiliência de ecossistemas costeiros e marinhos como pilar da adaptação e da mitigação climática e das ações de sustentabilidade (Steffen et al., 2018; UNEP, 2022). Essa abordagem reconhece que as mudanças climáticas, ao alterarem temperatura, salinidade, precipitação e nível do mar, influenciam diretamente a distribuição, a produtividade, e a funcionalidade dos manguezais e demais ECAs (Alongi, 2022; Rogers, 2021).

Apesar desses avanços, os ECAs continuam sob forte pressão antrópica, incluindo a expansão urbana e industrial, a aquicultura intensiva, a agricultura em larga escala, o turismo desordenado e a poluição difusa de origem doméstica e industrial (ICMBio, 2018; Bryan-Brown et al., 2020). Somados aos efeitos da elevação do nível do mar e à intensificação de eventos extremos, essas ameaças aumentam a vulnerabilidade desses ecossistemas, exigindo políticas costeiras mais integradas que aliem mitigação, adaptação e restauração ecológica (Kirwan et al., 2010; Lovelock & Reef, 2020).

Entre os diferentes ECAs, este estudo foca nos manguezais, dada sua ampla distribuição nas regiões costeiras do Brasil e sua expressiva capacidade de estocagem de carbono. Nesse contexto, as diretrizes globais de conservação costeira e os compromissos climáticos internacionais influenciam diretamente as estratégias nacionais de planejamento e manejo dos manguezais no Brasil, orientando a definição de prioridades de conservação, restauração e financiamento climático.

1.3 Importância Ecológica e Socioeconômica dos Manguezais

Os manguezais configuram-se como ecossistemas de transição entre ambientes terrestres e marinhos, localizados principalmente em regiões tropicais e subtropicais (Hamilton & Casey, 2016). Nesses ambientes, comunidades vegetais altamente especializadas desenvolveram adaptações morfológicas e fisiológicas que lhes permitem resistir à salinidade, ao alagamento periódico e à baixa disponibilidade de oxigênio (Schaeffer-Novelli et al., 2016).

Esses ecossistemas desempenham funções ecológicas essenciais, como a estabilização de sedimentos, a filtragem de poluentes, a ciclagem de nutrientes e a manutenção da qualidade da água, atuando como barreiras naturais contra a erosão costeira e a intrusão salina (Friess *et al.*, 2020). Além disso, constituem berçários para uma ampla diversidade de espécies aquáticas e terrestres, muitas delas de valor comercial, sendo fundamentais para a sustentabilidade pesqueira e alimentar em comunidades costeiras (Jänes *et al.*, 2020a; Jänes *et al.*, 2020b). Além de sua importância ecológica, os manguezais exercem papel fundamental na regulação climática, funcionando como importantes sumidouros de carbono. Sua elevada produtividade primária e a capacidade de armazenar matéria orgânica em sedimentos anóxicos fazem deles

um componente essencial dos ecossistemas de carbono azul, contribuindo significativamente para a mitigação das mudanças climáticas (Macreadie, 2021).

Do ponto de vista social e econômico, estima-se que até 80% das capturas mundiais de peixes estejam direta ou indiretamente relacionadas aos manguezais (Pham et al., 2021). O valor econômico médio desses serviços é estimado em cerca de US\$67 mil por hectare ao ano, reforçando sua relevância não apenas sob a ótica ambiental, mas também socioeconômica (Servino et al., 2018; Pedroza-Filho et al., 2023). Além dos benefícios econômicos diretos, os manguezais proporcionam proteção natural contra tempestades e marés de tempestade, reduzindo danos a infraestruturas costeiras e contribuindo para a segurança das populações humanas (Menéndez et al., 2020). Também possuem importância cultural e simbólica para comunidades tradicionais e povos costeiros, que deles dependem para alimentação, sustento e práticas culturais (Rodríguez-Rodríguez, 2025).

Entretanto, a degradação dos manguezais implica perdas ecológicas, sociais e econômicas de grande escala, comprometendo o equilíbrio das zonas costeiras e a segurança das populações que delas dependem. Globalmente, estima-se que mais de 524 mil hectares de manguezais tenham sido perdidos entre 1996 e 2020 (Bunting, 2018). No Brasil, as perdas no mesmo período somam cerca de 6 mil hectares, refletindo pressões localizadas associadas à expansão urbana, à conversão de uso do solo e à poluição costeira (Sayre, 2018., Bunting, 2022.). A conservação e a restauração dos manguezais, portanto, constituem estratégias essenciais para manter os serviços ecossistêmicos costeiros, garantir a resiliência socioambiental e contribuir de forma efetiva para a mitigação e adaptação às mudanças climáticas.

1.4 Marco Legal e Políticas de Conservação no Brasil

O reconhecimento da importância ecológica dos manguezais está assegurado desde a Constituição Federal de 1988, que os define como patrimônio nacional e determina que sua utilização deve ocorrer apenas sob critérios de sustentabilidade (Brasil, 1988). Nesse contexto, a Lei nº 7.661/1988 instituiu o Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro (PNGC), regulamentado pelo Decreto nº 5.300/2004, o qual estabeleceu diretrizes, competências e instrumentos para o manejo integrado da zona costeira (Brasil, 2004; MMA, 2015).

A criação do Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC), pela Lei nº 9.985/2000, consolidou princípios de manejo participativo, conservação da biodiversidade e integração federativa, oferecendo bases legais sólidas para a gestão de ecossistemas sensíveis como os manguezais (Brasil, 2000). Complementarmente, a Resolução CONAMA nº 303/2002 classificou os manguezais como Áreas de Preservação Permanente (APP), reforçando seu caráter de proteção integral (CONAMA, 2002).

Em 2006, o Decreto nº 5.758 instituiu o Plano Nacional de Áreas Protegidas (PNAP), com o objetivo de articular políticas de conservação, uso sustentável e restauração ambiental em escala nacional (Brasil, 2006). Esses instrumentos constituem o arcabouço jurídico central de suporte à conservação costeira no país.

No plano internacional, o Brasil é signatário da Convenção de Ramsar sobre Zonas Úmidas, que reconhece os manguezais e outros ecossistemas costeiros como áreas prioritárias para conservação e uso racional dos recursos (Ramsar Convention Secretariat, 2013). Atualmente, o país conta com 27 Sítios Ramsar, dos quais 24 se sobrepõem total ou parcialmente a Unidades de Conservação, e três integram mosaicos de Terras Indígenas e Áreas de Preservação Permanente (MMA, 2023). O status Ramsar confere prioridade na formulação de políticas públicas e facilita o acesso a mecanismos de cooperação técnica e financeira internacional (PNAP, 2006; Fundação Florestal, 2010). No estado de São Paulo, destaca-se o Complexo Estuarino-Lagunar de Cananéia-Iguape-Peruíbe, reconhecido como Sítio Ramsar em 2017, considerado referência nacional em conservação de zonas úmidas e manejo costeiro integrado.

Apesar desse robusto arcabouço normativo, persistem lacunas na integração entre políticas de conservação e instrumentos climáticos, o que ainda limita o reconhecimento efetivo dos ECAs nas estratégias nacionais. Embora o Brasil exerça protagonismo em soluções baseadas em florestas, a incorporação dos ECAs nas Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs) permanece incipiente (Gatti et al., 2021; Global Mangrove Alliance, 2022).

O país abriga cerca de 7.400 km de costa e 3,6 milhões de km² de Zona Econômica Exclusiva (Abreu, 2015), concentrando 8,1% da extensão global de manguezais — o equivalente a aproximadamente 11.072 km², distribuídos ao longo do litoral, com maior predominância nas regiões Norte e Sudeste (Bunting et al., 2018). Essa heterogeneidade ambiental — que varia de sistemas macrotidal amazônicos a fragmentos isolados no Sul e Sudeste — impõe desafios à elaboração de políticas unificadas (Schaeffer-Novelli et al., 2016).

Assim, o marco legal brasileiro oferece uma base sólida para a conservação dos manguezais, mas sua efetividade depende da integração mais estreita entre os instrumentos de planejamento costeiro, conservação da biodiversidade e mitigação climática, um desafio que reforça a importância de estudos regionais voltados à avaliação e ao aprimoramento dessas políticas.

1.5 Manguezais no Estado de São Paulo e na Baixada Santista

Os manguezais do litoral paulista representam componentes fundamentais da dinâmica costeira e da manutenção dos serviços ecossistêmicos regionais (ICMBio, 2018). Na Baixada Santista, delimitada pela Serra do Mar e pelo Oceano Atlântico, a intensa ocupação humana e a concentração industrial tornam essa região uma das mais críticas para a conservação de ecossistemas costeiros no Brasil. A coexistência entre zonas industriais e portuárias altamente ativas, como Cubatão e Santos, e áreas de elevada sensibilidade ecológica impõe desafios significativos à integridade ambiental e à sustentabilidade regional.

Apesar de sua relevância ecológica e social, apenas cerca de 40% dos manguezais da Baixada Santista estão inseridos em unidades de conservação, o que aumenta sua vulnerabilidade frente à expansão urbana, poluição e fragmentação de habitats (PMMA Santos, 2021; Moschetto et al., 2021). No estado de São Paulo, aproximadamente 9 mil hectares de manguezais encontram-se sob alguma categoria de proteção, de um total estimado de 24 mil hectares (ICMBio, 2018). Entre as unidades de conservação que incluem manguezais na microrregião de Santos, composta por Santos, São Vicente, Guarujá, Praia Grande, Cubatão e Bertioga, destacam-se o

Parque Estadual Restinga de Bertiooga, criado em 2010, e as Áreas de Proteção Ambiental (APA) da Serra de Santo Amaro e Serra do Guararu (Fundação Florestal, 2010).

O histórico de desenvolvimento urbano-industrial da região frequentemente negligenciou a capacidade de suporte dos ecossistemas, resultando na supressão de manguezais e restingas, bem como na alteração dos fluxos hidrossedimentares (Galvani & de Lima, 2011). A poluição industrial, especialmente proveniente do pólo petroquímico de Cubatão e do complexo portuário de Santos, contribuiu para a degradação da qualidade da água e do solo, afetando diretamente a fauna, a flora e os serviços ecossistêmicos (CETESB, 2021). Somam-se a isso as vulnerabilidades socioambientais, particularmente nas áreas estuarinas de Santos e São Vicente, onde comunidades tradicionais e populações de baixa renda ocupam zonas de risco, frequentemente sobre palafitas (MPSP, 2023). A carência de infraestrutura e saneamento básico adequado agrava os impactos ambientais, intensificando a contaminação dos corpos d'água e a perda de funções ecológicas.

Essas pressões se amplificam diante das mudanças climáticas globais, que ampliam a frequência e a severidade de fenômenos de maré alta, erosão costeira e intrusão salina, elevando o risco de colapso dos manguezais e consequente liberação de carbono estocado (Rogers, 2021; Lovelock & Reef, 2020). Em resposta, o Plano Estadual de Adaptação e Resiliência Climática do Estado de São Paulo (PEARC, 2025) estrutura ações com base em cinco eixos: Biodiversidade, Saúde Única, Segurança Alimentar e Nutricional, Segurança Hídrica e Zona Costeira, além de eixos transversais de Infraestrutura e Justiça Climática (SEMIL & GIZ, 2025). Embora o eixo costeiro ainda esteja em consolidação, o plano reconhece a vulnerabilidade dos ecossistemas marinhos e estuarinos, destacando a necessidade de integração entre conservação ambiental, desenvolvimento econômico e redução de emissões.

De forma complementar, o programa SP Carbono Zero (2023) estimula o engajamento de instituições públicas e privadas na descarbonização da economia paulista, alinhando-se à campanha internacional Race to Zero da ONU (SEMIL, 2023). Nesse contexto, a Adaptação Baseada em Ecossistemas (AbE) emerge como uma abordagem estratégica, de baixo custo e múltiplos benefícios, ao integrar conservação, mitigação climática e bem-estar social (Gattuso et al., 2018; Taillardat et al., 2018). Assim, incorporar o conceito de carbono azul à gestão costeira paulista representa um passo decisivo para fortalecer a resiliência regional e alinhar as políticas ambientais às metas de neutralidade climática e desenvolvimento sustentável (Steffen et al., 2018; UNEP, 2022). A Baixada Santista, nesse sentido, constitui um laboratório natural e estratégico para avaliar a eficácia das políticas de conservação e o potencial dos manguezais como soluções baseadas na natureza frente às mudanças climáticas.

1.6 Lacunas de Conhecimento e Justificativa do Estudo

Os desafios ambientais da Baixada Santista evidenciam a urgência de estudos aplicados que quantifiquem o papel dos manguezais no ciclo do carbono e sua contribuição para a mitigação climática regional. Embora o Brasil possua avanços significativos em pesquisas sobre carbono

azul, o litoral paulista permanece sub-representado em estimativas de sequestro e estoque de carbono (Kauffman, 2018; Rovai et al., 2021).

Pesquisas recentes sugerem que os manguezais da Baixada Santista apresentam taxas relevantes de acúmulo de carbono, mas com forte variabilidade espacial associada ao grau de conservação e à intensidade das pressões antrópicas (Rosa et al., 2022., Andrade, 2025). Essa variação indica que a presença de unidades de conservação pode exercer um papel determinante na manutenção da funcionalidade ecológica e climática desses ecossistemas, sobretudo em áreas urbanizadas e industrializadas.

Contudo, ainda não se sabe, de forma quantitativa, em que medida o grau de conservação pode influenciar o sequestro e o estoque de carbono nos manguezais da Região Metropolitana da Baixada Santista. Essa lacuna de conhecimento limita a compreensão sobre o potencial dessas áreas em resguardar os estoques naturais de carbono azul e, consequentemente, em sustentar iniciativas de compensação ou créditos de carbono baseados na conservação de ecossistemas costeiros.

Diante desse cenário, o presente estudo propõe uma análise comparativa da dinâmica do carbono azul em manguezais sob diferentes níveis de proteção e uso, utilizando modelagem espacial e temporal. Ao integrar métricas ecológicas e climáticas, esta pesquisa busca quantificar os benefícios climáticos associados à conservação dos manguezais e subsidiar políticas públicas. Assim, pretende-se contribuir para o avanço do conhecimento científico sobre o papel climático dos ecossistemas costeiros paulistas e fortalecer a base técnica para estratégias de conservação, restauração e adaptação climática.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar e comparar o sequestro e o estoque de carbono nos manguezais da Região Metropolitana da Baixada Santista, considerando diferentes condições de conservação — áreas inseridas e não inseridas em unidades de conservação —, por meio de modelagem espacial e temporal utilizando o modelo InVEST Coastal Blue Carbon

2.2 Objetivos Específicos

- Verificar diferenças no estoque de carbono azul em manguezais submetidos a distintos níveis de conservação.
- Modelar o estoque e o sequestro de carbono sob três cenários de manejo, utilizando o InVEST Coastal Blue Carbon.
- Fornecer subsídios técnicos para o planejamento costeiro e para estratégias de mitigação das mudanças climáticas no litoral paulista.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Área de Estudo

Para atingir os objetivos propostos, inicialmente foi realizada a delimitação da área de estudo, que compreende uma das regiões costeiras mais densamente ocupadas e ambientalmente relevantes do Brasil. A Baixada Santista abriga a maior continuidade de manguezais do estado de São Paulo, ecossistemas de elevada importância ecológica e socioeconômica, responsáveis por serviços ambientais essenciais como o sequestro de carbono, a estabilização costeira e o suporte à biodiversidade (ICMBio, 2018; Moschetto et al., 2021).

A área de estudo engloba os municípios que compõem a Região Metropolitana da Baixada Santista (RMBS) — Bertioga, Cubatão, Guarujá, Santos, São Vicente, Praia Grande, Itanhaém e Peruíbe —, excluindo-se Mongaguá, devido a ausência de manguezais. Também foram incluídos o Complexo Estuarino-Lagunar Cananéia-Iguape-Peruíbe e a Ilha Comprida, localizados no litoral sul do estado de São Paulo. Essa abrangência territorial foi definida de modo a representar diferentes contextos de conservação e uso, incluindo áreas protegidas e não protegidas, setores urbanos e zonas estuarinas abrigadas, de forma a capturar a diversidade estrutural, funcional e ambiental dos manguezais paulistas. Para o momento atual, optou-se por focar os municípios de Santos e Cananéia devido à representatividade ecológica de seus manguezais e às distintas pressões históricas da Baixada Santista. A região apresenta ocupação urbana intensa e expansão imobiliária que modificam a paisagem costeira e afetam ecossistemas sensíveis (Schaeffer-Novelli et al., 2003; Sampaio & Ferreira, 2008). Assim, a comparação entre áreas submetidas a pressões ambientais contrastantes permite avaliar potenciais impactos sobre o estoque e o sequestro de carbono.

A Figura 1 apresenta a distribuição dos manguezais na área de estudo, cuja delimitação espacial e classificação quanto ao nível de proteção foram realizadas a partir de dados da Fundação Florestal do Estado de São Paulo, integrando diferentes bases cartográficas oficiais, como o Inventário Florestal do Estado de São Paulo (2018), a Vegetação do Brasil (IBGE, 2012), o MapBiomias (Coleção 10; Souza et al., 2023) e o Global Mangrove Watch (Bunting et al., 2018). Na Baixada Santista, 3.986,68 ha de manguezais encontram-se inseridos em Unidades de Conservação, enquanto 14.599,14 ha permanecem fora dessas áreas. No Litoral Sul, observa-se o padrão oposto: 15.775,85 ha estão protegidos e apenas 3.026,17 ha localizam-se fora de Unidades de Conservação. Esse contraste regional evidencia como diferentes arranjos de proteção influenciam a distribuição dos manguezais, servindo de referência para as análises desenvolvidas neste estudo.

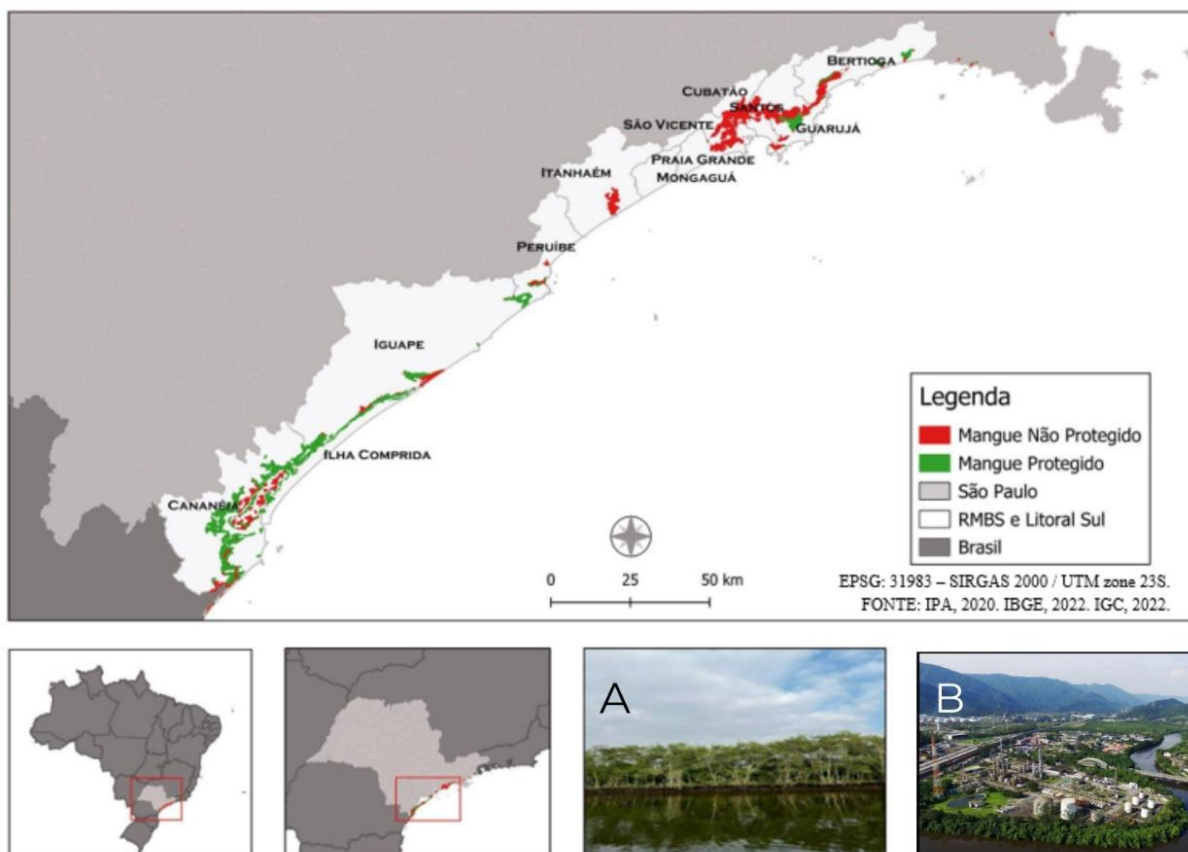


Figura 1. Mapa da área de estudo, indicando os nove municípios da Região Metropolitana da Baixada Santista e os três municípios que compõem o Litoral Sul, delimitando áreas de manguezais protegidos (indicados em verde) e áreas de manguezal não protegidas (indicadas em vermelho). A imagem A indica manguezais de Ilha Comprida, que estão dentro de uma unidade de conservação (Fonte: autoral, 2024) e a imagem B ilustra a Refinaria de Petróleo presente em Cubatão (Fonte: Dronestag, 2015).

3.2 Obtenção e processamento dos dados

3.2.1 Mapeamento e Integração de Dados Espaciais dos Manguezais

A delimitação espacial dos manguezais e a classificação do seu nível de proteção foram realizadas a partir de dados obtidos da Fundação Florestal de São Paulo. Esses dados foram gerados a partir da integração de quatro bases cartográficas principais: o Inventário Florestal do Estado de São Paulo (Fundação Florestal, 2018), a Vegetação do Brasil (IBGE, 2012), o MapBiomas Coleção 10 (Souza et al., 2023) e o Global Mangrove Watch – GMW (Bunting et al., 2018). O Inventário Florestal utilizou imagens dos satélites *WorldView I, II, III* e *GeoEye I NIR*, com resolução espacial de 0,5 m, referentes ao período de 2016–2018 (Nalon, 2022). Por fim, o Global Mangrove Watch foi empregado para validação da cobertura, com base em dados de radar (*JERS-1, ALOS PALSAR* e *ALOS-2 PALSAR-2*) de 25 m de resolução. As quatro camadas foram harmonizadas quanto ao sistema de referência geográfica e interseccionadas com as bases de limites municipais (IBGE, 2022) e Unidades de Conservação (CNUC, 2023). Maiores detalhes sobre o procedimento de integração e validação da distribuição dos manguezais estão descritos em Paschoalon, 2024. A adoção de dados espaciais pré-existent

da distribuição de manguezais na região teve como objetivo assegurar a compatibilidade com as bases oficiais da Fundação Florestal de São Paulo, de modo que os resultados deste estudo pudessem fortalecer iniciativas institucionais já existentes voltadas à conservação dos manguezais da região.

3.3 Modelagem Estatística das Diferenças de Estoque de Carbono Azul em Manguezais Protegidos e Não Protegidos

Esta etapa teve como objetivo avaliar se existem diferenças significativas nos estoques de carbono azul entre manguezais localizados dentro e fora de Unidades de Conservação (UCs). Para isso, foram utilizados bancos de dados globais de carbono costeiro para compensar a escassez de medições locais na Baixada Santista e ampliar a representatividade estatística do modelo. Essa abordagem permitiu calibrar as estimativas regionais com base em informações provenientes de diferentes regiões tropicais e subtropicais, aumentando a robustez e a comparabilidade dos resultados.

Para isso, foram integrados cinco bancos de dados globais: Coastal Carbon Atlas (Smithsonian Institution, 2023), Global Mangrove Soil Carbon Dataset (Sanderman et al., 2018), CSIRO Carbon Data for Australia (Serrano et al., 2019), e Carbon Data for Victoria, Australia (Ewers Lewis *et al*, 2018). Os dados de carbono para biomassa e solo foram processados e georreferenciados por suas coordenadas de latitude e longitude, processadas no QGIS 3.40.5, e sobrepostos aos limites das áreas protegidas obtidos via World Database on Protected Areas (WDPA, 2025) e Cadastro Nacional de Unidades de Conservação (CNUC, 2023). Essa sobreposição permitiu identificar os dados situados em manguezais protegidos e não protegidos e calcular os valores médios de estoque de carbono para cada grupo.

A análise estatística foi conduzida no R 4.5.1 (RStudio, 2025). Como os dados não apresentaram distribuição normal, inicialmente aplicou-se o teste de Mann–Whitney (U-test) utilizando a função `wilcox.test` do pacote `stats`, incluído na distribuição base do R. Em seguida, ajustou-se um Modelo Linear Generalizado Misto (GLMM) com distribuição Tweedie e link log, adequado para dados ambientais contínuos positivos e assimétricos. O modelo incluiu interceptos aleatórios para os fatores *país* e *dataset*, a fim de controlar variações regionais e metodológicas, e efeitos fixos para as variáveis *inside_uc* (dentro ou fora de Unidade de Conservação), *abs_lat_s* (latitude absoluta sul) e a interação $inside_uc \times abs_lat_s$. Essa estrutura permitiu avaliar estatisticamente a influência da proteção legal e da latitude sobre os estoques de carbono nos manguezais tropicais e subtropicais. Modelos complementares ($LM \log(y+1)$) foram utilizados como checagem de robustez, confirmando a consistência dos resultados. Os diagnósticos de ajuste, realizados com o pacote DHARMA (Hartig, 2020), não indicaram padrões significativos de resíduos ou heterocedasticidade.

Os resultados estimados pelo GLMM foram utilizados para parametrizar as diferenças relativas entre áreas protegidas e não protegidas na etapa subsequente de modelagem espacial com o InVEST Coastal Blue Carbon (descrito nas seções 3.4 e 3.5). Dessa forma, os resultados estatísticos serviram como base quantitativa para estimar os impactos da conservação sobre o estoque carbono azul nos manguezais paulistas.

3.4 Modelando a dinâmica de carbono azul em manguezais em diferentes cenários de conservação

A modelagem espacial foi conduzida no InVEST 3.14.3 (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs), utilizando o módulo Coastal Blue Carbon, que estima o estoque, o sequestro e o acúmulo líquido de carbono em ecossistemas costeiros a partir de séries temporais de uso e cobertura do solo (Natural Capital Project, 2022) (Tab.1). O modelo foi escolhido por sua ampla aplicação em estudos de carbono azul, especialmente em contextos de escassez de medições locais, e por permitir integrar informações espaciais e parâmetros ecológicos de forma transparente e reprodutível.

Tabela 1. Definições dos termos essenciais utilizados pelo InVEST sobre carbono azul utilizados neste estudo.

Estoque	Quantidade total de carbono já armazenado no ecossistema, somando os três reservatórios modelados pelo InVEST: biomassa, solo (sedimentos) e material morto (litter). Representa o carbono acumulado ao longo do tempo e que permanece retido, a menos que haja distúrbio
Acúmulo	Taxa pela qual o ecossistema adiciona carbono aos seus reservatórios, principalmente no solo. No InVEST, refere-se ao carbono retido anualmente após processos iniciais de decomposição, sendo considerado acúmulo líquido no sedimento.
Sequestro (<i>net carbon sequestration</i>)	Diferença entre carbono acumulado e carbono perdido ao longo de um período. O sequestro líquido indica se o ecossistema atua como fonte ou como sumidouro de carbono em um intervalo específico.
Reservatório (<i>carbon pool</i>)	Compartimentos onde o carbono é armazenado. No InVEST são três: biomassa, solo (sedimentos) e litter (material morto).
Biomassa	Carbono armazenado na vegetação viva acima e abaixo do solo (raiz e parte aérea). Pode ser perdido rapidamente caso haja conversão do habitat.
Solo (<i>sedimento</i>)	Maior reservatório de carbono nos manguezais. Acumula carbono ao longo de décadas a milênios, sendo considerado um estoque estável, com grande relevância climática.
Material morto (<i>litter</i>)	Material vegetal caído e em decomposição (folhas, galhos). Representa um reservatório menor e transitório dentro do ciclo do carbono.
Meia-vida (<i>half-life</i>)	Tempo necessário para que metade do carbono presente em um reservatório seja perdida por decomposição ou mineralização. Aplica-se a biomassa e solo, influenciando o ritmo de perda após distúrbio.

Para a etapa de modelagem espaço-temporal utilizando o InVEST Coastal Blue Carbon, foi utilizada a série histórica do MapBiomas Coleção 10, que abrange o período de 1985 a 2021 e classifica o uso e a cobertura do solo a partir de imagens dos satélites Landsat (resolução espacial de 30 m). Essa base permitiu a análise das mudanças no uso e cobertura do solo associadas aos manguezais ao longo de 36 anos. Todo o processamento geoespacial foi realizado no QGIS 3.40.5, resultando no shapefile final empregado nas etapas subsequentes da

modelagem. A primeira UC foi fundada em 1962, porém 1985 foi adotado como ano base do estudo, pois a série histórica do MapBiomias inicia neste ano.

A série histórica analisada (1985–2021) corresponde à disponibilidade da Coleção 10 do MapBiomias (2025) e representa o período de maior continuidade de registros após a criação da primeira UC com manguezais na região (Parque Estadual Ilha do Cardoso, 1962). Como a série histórica do MapBiomias se inicia em 1985, este ano foi adotado como data base do estudo, representando o primeiro marco temporal de referência para a modelagem espaço-temporal da cobertura e conservação dos manguezais (Figura 2). Todo o processamento geoespacial foi realizado no QGIS 3.40.5 (2024) e RStudio 4.5.1 (2025).



Figura 2. Linha do tempo datando as unidades de conservação com manguezais da RMBS e Litoral Sul. Fonte: World Data for Protected Areas, 2025 e Cadastro Nacional de Unidades de Conservação (CNUC), 2023.

3.4.1 Reclassificação e compatibilização das Unidades de Conservação

Para assegurar a consistência entre as diferentes fontes de dados, procedeu-se à reclassificação das categorias de Unidades de Conservação (UCs). As bases espaciais do Cadastro Nacional de Unidades de Conservação (CNUC, 2023) e do World Database on Protected Areas (WDPA, 2025) foram harmonizadas no QGIS 3.40.5 (2024), compatibilizando as categorias do Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC) com as da União Internacional para a Conservação da Natureza (IUCN), conforme o framework proposto por Dudley (2008). A Tabela 2 apresenta a harmonização implementada no estudo e o CODE final acrescentado na tabela de atributos do shapefile. Na tabela de atributos, foi criada uma variável condicional (CODE) que atribui valores numéricos às categorias de manejo: IUCN I = 100; II = 200; III = 300; IV = 400; V = 500; VI = 600 (Tabela 3). As áreas de manguezal não protegidas foram mantidas com a codificação original do MapBiomias (“5”, classe Manguezal). Essa reclassificação foi executada no RStudio (R 4.5.1, 2025), gerando rasters reclassificados que

serviram como insumos para o pré-processador do InVEST. O procedimento assegurou coerência entre as classes de uso e cobertura e as categorias de manejo adotadas no modelo.

Tabela 2. Relação entre as categorias do SNUC e da IUCN e respectivos códigos (CODE) utilizados no modelo para parametrização neste estudo.

Categoria SNUC	Categoria IUCN	DESCRIÇÃO	Classe IUCN	CODE
ESTAÇÃO ECOLÓGICA (E.E)	Reserva Natural Estrita ou Área de Preservação de Natureza Selvagem	Proteção integral e pesquisa científica	I	100
PARQUE ESTADUAL (P.E)	Parque Nacional	Proteção integral e visitação controlada	II	200
ÁREA DE RELEVANTE INTERESSE ECOLÓGICO (A.R.I.E)	Monumento Natural	Proteção Integral	III	300
ÁREA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL (APA)	Área de gestão de habitat	Uso sustentável e ordenamento territorial	IV	400
RESERVA DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (RDS)	Paisagem terrestre ou marinha protegida	Uso Sustentável	V	500
RESERVA EXTRATIVISTA (RESSEX)	Áreas protegidas, com uso sustentável dos recursos naturais	Uso Sustentável	VI	600
ÁREA DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE (APP)	-	-	-	5

3.4.2 Parametrização do modelo

O modelo Coastal Blue Carbon é composto por duas etapas interdependentes: o pré-processador (*Coastal Blue Carbon Preprocessor*) e o modelo principal (*Coastal Blue Carbon*). A primeira etapa requer duas tabelas de entrada: (1) Tabela de Marcos Temporais, contendo os rasters reclassificados para cada ano de análise, e (2) Tabela de Referência, que identifica as classes de uso e cobertura do solo consideradas habitats de carbono azul — neste estudo, exclusivamente a classe manguezal.

Como saída, o pré-processador gera duas novas tabelas: (3) Tabela Biofísica, que reúne os valores médios de carbono por reservatório (i.e., biomassa, serrapilheira/necromassa e solo).

(4) Matriz de Transição, que registra as mudanças nas classes de cobertura entre os períodos analisados. Essa matriz foi construída a partir da sobreposição dos rasters reclassificados, classificando as transições de acordo com seu nível de impacto: baixo para mudanças entre formações vegetais, médio para transições entre ecossistemas naturais (como de manguezal para rios, praia ou areal) e alto para conversões antrópicas (Pendleton et al., 2012).

Os parâmetros biofísicos (i.e., estoque inicial e taxa anual de sequestro de carbono azul) foram obtidos de estudos realizados em regiões próximas — especialmente em Cananéia e Iguape — e complementados por bases globais de dados (Tabela 3). Para parametrizar o modelo InVEST, assumiu-se que áreas não protegidas apresentam uma taxa basal de acúmulo anual de carbono no solo de $8,24 \text{ tCO}_2\text{e ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, valor derivado dos dados globais compilados por Rovai et al. (2021). Conforme evidências apresentadas por Pérez et al. (2017), considerou-se que áreas protegidas apresentam, de forma conservadora, cerca de 1,5 vezes mais sequestro de carbono do que áreas não protegidas (Tabela 3). Assim, utilizou-se o valor de referência para a categoria IUCN V como baseline, extrapolando taxas progressivamente maiores para as categorias de proteção III–IV e I–II, de acordo com o gradiente de efetividade da proteção. Esses valores fundamentam a construção dos cenários e foram posteriormente avaliados na análise de sensibilidade (Tabela 4), garantindo coerência interna e confiabilidade dos resultados. Todos os valores foram convertidos de carbono (C) para dióxido de carbono equivalente (CO_2e) utilizando o fator 3,67 (IPCC, 2019).

Tabela 3. Valores assumidos como parâmetro para a tabela biofísica do InVEST.

ATRIBUTOS	Valor (toneladas C ha ⁻¹)	Valor (toneladas CO ₂ e ha ⁻¹ yr ⁻¹)	Referências
Estoque de carbono inicial – acima do solo (<i>aboveground</i>)	67 tC ha ⁻¹	245.89 tCO ₂ e ha ⁻¹	Rovai et al. (2022)
Estoque de carbono inicial – abaixo do solo (<i>belowground</i>)	29 tC ha ⁻¹	106.43 tCO ₂ e ha ⁻¹	Rovai et al. (2022)
Estoque de carbono inicial – solo	281 tC ha ⁻¹	1031.27 tCO ₂ e ha ⁻¹	Rovai et al. (2022)
Taxa de sequestro - biomassa	4.64 tC ha ⁻¹	16.89 tCO ₂ e ha ⁻¹ yr ⁻¹	Rovai et al. (2021)
Taxa de sequestro - solo	2.83 tC ha ⁻¹	10.39 tCO ₂ e ha ⁻¹ yr ⁻¹	Rovai et al. (2021)
SEQUESTRO DE CARBONO ASSUMIDO PARA DIFERENTES CATEGORIAS			
Categorias	Valor (toneladas CO₂e ha⁻¹ yr⁻¹)	Premissas	
5	8.24 tCO ₂ e ha ⁻¹ yr ⁻¹	Conservadora — baseada em Pérez et al. (2017), que estimam taxa de sequestro 1,5 vez maior em áreas protegidas.	
IUCN V–VI	10.30 tCO ₂ e ha ⁻¹ yr ⁻¹	Número de referências , baseado em Rovai et al. (2021)	
IUCN III–IV	12.36 tCO ₂ e ha ⁻¹ yr ⁻¹	Conservadora — baseada em Pérez et al. (2017), que estimam taxa de sequestro 1,5 vez maior em áreas protegidas.	
IUCN I–II	14.54 tCO ₂ e ha ⁻¹ yr ⁻¹		

3.4.3 Simulação dos cenários de manejo

Com base nas informações reclassificadas e parametrizadas, o modelo Coastal Blue Carbon foi configurado para simular três cenários de manejo, representando diferentes estratégias de conservação dos manguezais:

- **Cenário 1** — Conservação (Business as Usual): manutenção das condições atuais, sem criação de novas unidades de conservação após 2021.
- **Cenário 2** — Perda de proteção: remoção das categorias de manejo IV, V e VI no período de 2030 a 2050.
- **Cenário 3** — Expansão da proteção: inclusão de todas as áreas de manguezal em categorias de unidade de conservação no mesmo intervalo temporal.

Para os Cenários 2 e 3, foram implementados ajustes espaciais adicionais no QGIS, refletindo modificações hipotéticas na extensão das UCs e seus efeitos sobre o carbono azul:

- No Cenário 2 (Perda de proteção), aplicou-se um redimensionamento proporcional das áreas de UC, redistribuindo 80% das áreas protegidas para áreas não protegidas e mantendo 20% como protegidas. O redimensionamento foi realizado conforme a proporção observada nas estatísticas de área do QGIS e simulando a remoção das categorias menos restritivas, isto é, IV, V e VI.
- No Cenário 3 (Expansão da proteção), todas as áreas de manguezal originalmente não protegidas foram reclassificadas como protegidas, representando a inclusão total dos manguezais em categorias de proteção formal.

Os outputs, estoque de carbono, acúmulo de carbono e sequestro líquido total de carbono, foram expressos em toneladas CO₂e ha⁻¹, fornecendo a base para análises espaciais e comparativas entre áreas protegidas e não protegidas.

3.4.3 Análise de sensibilidade

Além das análises principais, foi conduzida uma análise de sensibilidade com o objetivo de avaliar a robustez das estimativas de sequestro e acúmulo de carbono ao longo do tempo. Esse procedimento permitiu testar a influência das incertezas associadas aos parâmetros biofísicos utilizados, verificando como variações conservadoras para mais e para menos poderiam afetar os resultados finais do modelo. Nesse caso, testamos dois cenários alternativos: BAIXO e ALTO, os quais representam reduções ou incrementos sistemáticos nos dados iniciais do modelo para a taxa de sequestro de carbono (Tabela 4). A comparação entre os três cenários permitiu analisar a estabilidade dos padrões espaciais e temporais detectados, assegurando que as conclusões não fossem dependentes de um único conjunto de parâmetros. Os resultados para esta sessão podem ser vistos em apêndice.

Tabela 4. Valores assumidos como parâmetro para a tabela biofísica nos cenários Baixo e Alto para a Análise de Sensibilidade.

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE		
CATEGORIA	Baixo	Alto
Não Protegido	7.00 tCO ₂ e ha ⁻¹ yr ⁻¹	9.48 tCO ₂ e ha ⁻¹ yr ⁻¹
IUCN V–VI	8.76 tCO ₂ e ha ⁻¹ yr ⁻¹	11.85 tCO ₂ e ha ⁻¹ yr ⁻¹
IUCN III–IV	10.5 tCO ₂ e ha ⁻¹ yr ⁻¹	14.21 tCO ₂ e ha ⁻¹ yr ⁻¹
IUCN I–II	12.34 tCO ₂ e ha ⁻¹ yr ⁻¹	16.70 tCO ₂ e ha ⁻¹ yr ⁻¹

3.5 Análise e interpretação dos resultados

Após a execução do modelo Coastal Blue Carbon, os resultados do modelo foram exportados em formato raster (.tif). Os resultados analisados neste estudo incluem estoque de carbono azul, acúmulo de carbono azul e sequestro líquido de carbono azul para cada cenário e período analisado. A análise comparativa entre manguezais protegidos e não protegidos foi conduzida no RStudio (R Core Team, 2023), com automatização de séries temporais e visualizações utilizando os pacotes *tidyverse* (Hernangómez, 2023), *dplyr*, *ggplot2* (Wickham, 2016), *sf* (Pebesma, 2018), *terra* (Hijmans, 2025) e *purrr* (Maclean, 2024). As visualizações agregadas por cenário e período, incluindo análises de sensibilidade (High e Low) foram apresentadas em gráficos de barras e séries temporais geradas no RStudio. Para cada ano final dos intervalos produzidos pelo InVEST, foram geradas camadas de “dentro” e “fora” de Unidades de Conservação com base no ano de criação de cada UC (campo *STATUS_YR* do WDPA). As extrações espaciais foram realizadas com *terra: extract()* (Hijmans, 2025), que calculou a soma total dos valores de carbono (tCO₂e) para cada feição municipal em cada período, tanto para estoque quanto para sequestro líquido. Na Figura 3, é possível observar uma síntese da metodologia utilizada neste trabalho.



Figura 3. Figura da metodologia simplificada do processo empregado neste estudo.

4. RESULTADOS

4.1 Modelagem Estatística das Diferenças de Estoque de Carbono Azul em Manguezais Protegidos e Não Protegidos

Os resultados dos modelos **GLMM Tweedie** evidenciaram um efeito positivo e consistente da proteção legal sobre o estoque de carbono nos manguezais analisados. Para os dados de estoque de carbono de biomassa e solo, o coeficiente associado à condição dentro de Unidade de Conservação apresentou sinal positivo, indicando maiores valores médios de carbono nessas áreas.

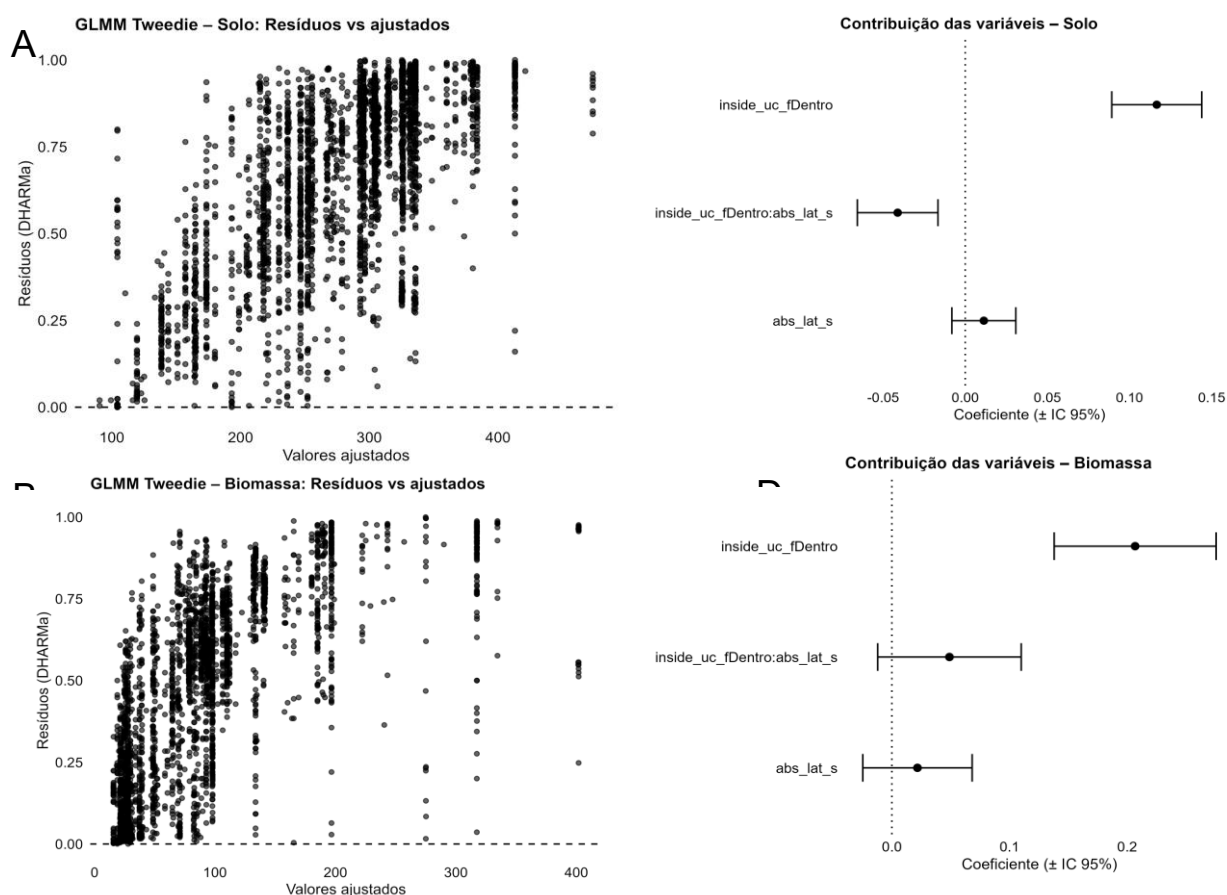


Figura 4. Análise de resíduos GLMM para solo (A) e biomassa (B). Contribuição das variáveis testadas no GLMM considerando os dados de estoque de carbono para (C) solo e (D) biomassa.

No caso da biomassa, o efeito foi moderado, mas coerente com o padrão ecológico esperado, com incremento médio de aproximadamente 23% em relação às áreas não protegidas, enquanto para o solo mostrou-se estatisticamente significativo, com incremento médio de aproximadamente 12% em relação às áreas não protegidas. A variável latitude apresentou apenas uma tendência fraca, associada a leve diminuição dos estoques em regiões mais austrais, sem significância estatística robusta. A interação entre proteção e latitude não foi expressiva para a biomassa e, no caso do solo, embora estatisticamente detectável, indicou apenas uma

redução discreta do efeito de proteção em latitudes mais altas, mantendo o benefício das UCs relativamente constante ao longo do gradiente costeiro. As análises de resíduos (Figura 4) confirmaram a adequação geral dos modelos, sem padrões estruturais evidentes, ainda que com leve heterocedasticidade em valores ajustados mais elevados, o que mostra um comportamento esperado em dados ecológicos heterogêneos. Em conjunto, esses resultados reforçam que a presença de Unidades de Conservação é um fator determinante na manutenção e estabilidade dos estoques de carbono azul, superando a influência da variação geográfica e evidenciando o papel central do manejo e da integridade ecológica na mitigação climática regional.

4.2 Modelando a dinâmica de carbono azul em manguezais em diferentes cenários de conservação

4.2.1 Cenário 1 (*Business as usual*)

Sob o cenário de tendência atual (*Business as Usual*), observou-se manutenção dos estoques de carbono azul com leve acréscimo projetado até 2030, refletindo estabilidade na cobertura vegetal e continuidade dos processos ecológicos de sequestro nos manguezais da Região Metropolitana da Baixada Santista. Conforme evidenciado na Figura 8, as áreas dentro de Unidades de Conservação (UCs) apresentaram sistematicamente valores mais elevados de estoque ao longo de toda a série temporal (1985–2030), indicando maior resiliência estrutural e menor suscetibilidade à perda de carbono. Em contraste, as áreas fora de UCs mantiveram estoques menores, porém com tendência positiva moderada, sugerindo recuperação parcial ou estabilidade relativa em zonas não formalmente protegidas.

O sequestro anual (Figura 5) apresentou flutuações marcantes, com picos concentrados entre 1989–2002 e 2021–2030, períodos mais longos de análise, o que possibilitou visualizar a performance do sequestro em um período mais extenso de tempo. As diferenças entre categorias foram mais expressivas nesses momentos de maior atividade de sequestro, reforçando a importância da proteção formal na manutenção da produtividade ecológica dos manguezais a longo prazo.

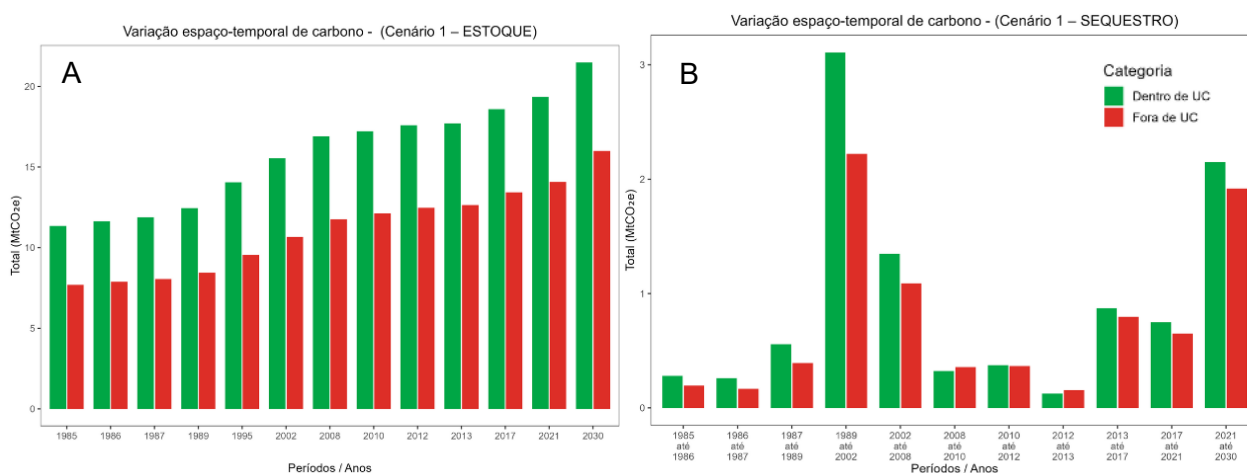


Figura 5. Variação do **estoque** (A) e **sequestro** (B) de carbono dentro de UC (barras verdes) e fora de UC (barras vermelhas) nos parâmetros do cenário 1 para a RMBS.

Esses resultados indicam que, sob o regime de manejo atual, os manguezais da Baixada Santista tendem a conservar sua capacidade de mitigação climática, embora a estabilidade observada dependa da continuidade das políticas de conservação e do controle das pressões antrópicas regionais.

Na Figura 6 apresenta-se a variação temporal do sequestro líquido de carbono azul para os municípios de Cananéia e Santos, selecionados como cenários representativos para os resultados deste trabalho. A análise dos valores estimados pelo modelo evidencia dinâmicas contrastantes entre os dois municípios. Em Cananéia, observa-se que as áreas de mangue inseridas em Unidades de Conservação apresentam magnitudes de sequestro líquido consistentemente superiores ao longo de todo o período avaliado, com picos que ultrapassam 1.000.000 tCO₂e em determinados intervalos e tendência de recuperação após quedas pontuais. As áreas fora de UC no município mantêm valores substancialmente menores, geralmente abaixo de 300.000 tCO₂e, com oscilações mais suaves e ausência de picos expressivos. Em contraste, Santos apresenta apenas valores referentes às áreas fora de UC, uma vez que o município não dispõe de manguezais inseridos em Unidades de Conservação. O padrão temporal em Santos evidencia variações amplas, com incrementos marcantes entre alguns períodos e reduções acentuadas em outros, alcançando máximos próximos de 500.000 tCO₂e no intervalo mais recente. Em conjunto, esses resultados reforçam que a presença de áreas protegidas contribui para maiores taxas de sequestro líquido, ao passo que regiões submetidas à urbanização histórica e ocupações irregulares exibem menor capacidade de manutenção e estabilidade desse fluxo ao longo do tempo.

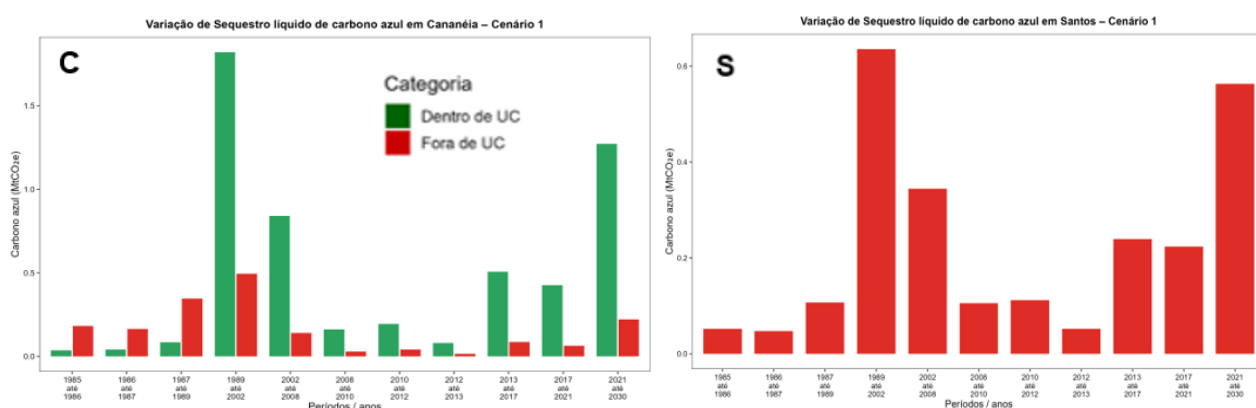


Figura 6. Evolução do **sequestro** de carbono nos municípios de Cananéia (C) e Santos (S) ao longo dos anos. Santos não apresenta a categoria “dentro de UC”, pois não possui unidades de conservação no município que contemplem manguezais.

Para a análise de acúmulo de carbono (Figura 7), em Cananéia, observa-se um pico expressivo dentro de Unidades de Conservação entre 1989–2002, quando o acúmulo ultrapassa 2 milhões de tCO_{2e}, valor que não é reproduzido em nenhum outro período subsequente, o que demonstra que ao decorrer de maiores intervalos é possível observar uma performance mais acentuada e crescimento substancial desses ecossistemas. Após essa fase, os níveis diminuem para cerca de 0,35–0,40 milhão de tCO_{2e} entre 2008–2013, com posterior recuperação moderada, alcançando aproximadamente 1,6 milhão de tCO_{2e} no período projetado de 2021–2030. Nas áreas fora de UC, os valores são consistentemente menores, com máximo de cerca de 0,6 milhão de tCO_{2e} entre 1989–2002 e quedas subsequentes para valores inferiores a 0,1 milhão de tCO_{2e} entre 2008–2013, recuperando-se apenas parcialmente no período final. Em Santos, o acúmulo apresenta um máximo ao redor de 0,75 milhão de tCO_{2e} entre 1989–2002, seguido de declínio para cerca de 0,15 milhão de tCO_{2e} entre 2008–2013. Somente no intervalo 2021–2030 ocorre nova elevação, aproximando-se de 0,6 milhão de tCO_{2e}, embora ainda abaixo dos valores observados nos cenários preservados de Cananéia. Esses resultados indicam que áreas sob proteção mantêm maior estabilidade e capacidade de retenção de carbono ao longo do tempo, enquanto áreas sujeitas a intensa pressão urbana apresentam padrões mais instáveis, menores picos de acúmulo e maior suscetibilidade a perdas.

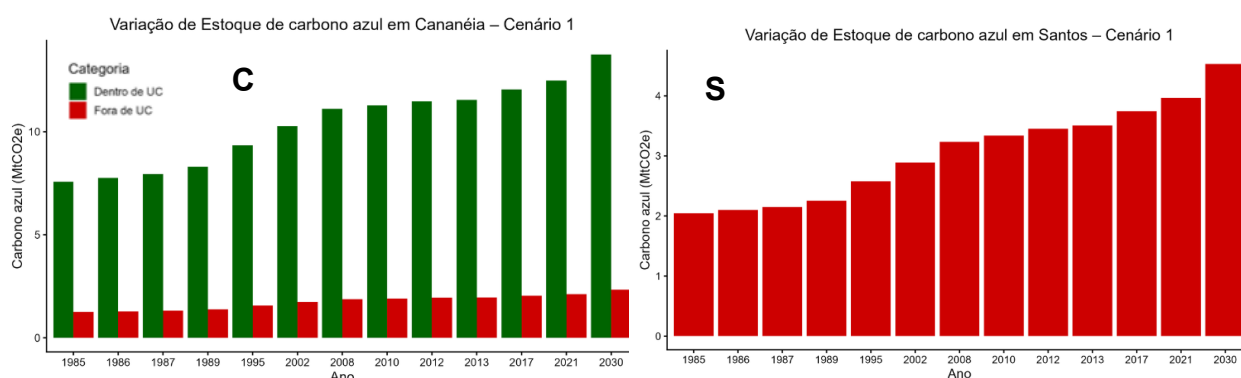


Figura 7. Variação do **estoque** de carbono em Cananéia (C) e Santos (S) até 2030, caso o status quo de conservação seja mantido, conforme as prerrogativas do cenário 1.

Esses contrastes podem estar associados tanto a particularidades de solo e hidrodinâmica quanto à intensidade das pressões antrópicas.

4.2.2 Cenário 2 (Perda de Proteção)

No Cenário 2, que simula a exclusão das categorias IV, V e VI de Unidades de Conservação — correspondentes às áreas de uso sustentável (APAs, RDS e Resex) — a partir de 2030, foi observada uma redistribuição acentuada dos estoques e fluxos de carbono azul (Figura 8). Como essas categorias representam cerca de 80% das UCs da região, sua transferência para a

condição “fora de UC” produziu uma mudança expressiva na dinâmica espacial do carbono, refletindo a vulnerabilidade dos manguezais diante da perda de proteção legal.

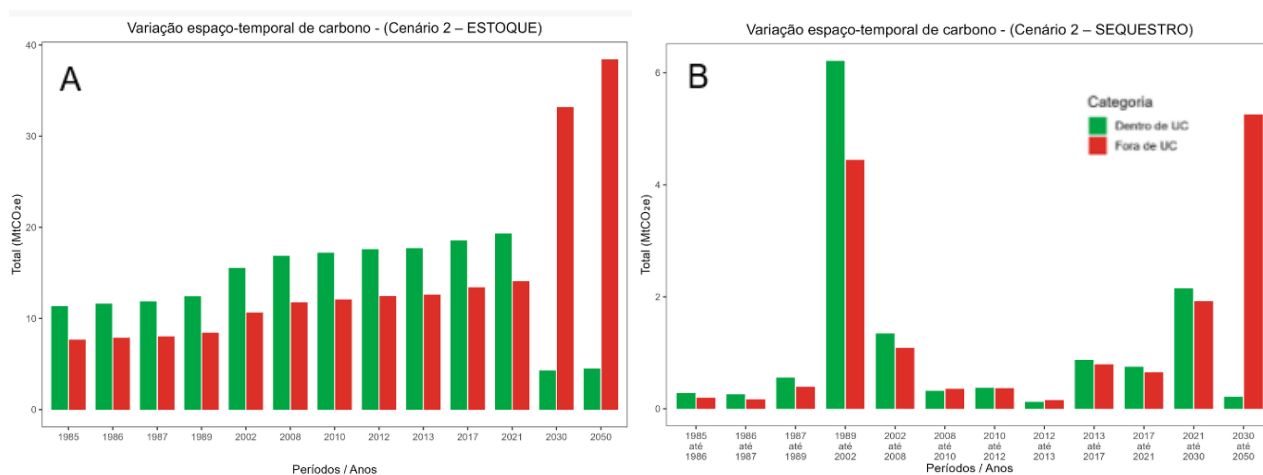


Figura 8. Variação do **estoque** (A) e **sequestro** (B) de carbono dentro de UC (barras verdes) e fora de UC (barras vermelhas) nos parâmetros do cenário 2 para a RMBS.

Conforme ilustrado na Figura 9, a partir de 2030 ocorre uma transferência aparente de estoques das áreas “dentro” para as “fora” das UCs, resultado da redistribuição territorial associada à perda de proteção. Esse aumento fora das UCs não representa um ganho real de carbono, mas reflete a transferência de energia e funcionalidade ecológica de áreas anteriormente maduras e estáveis, agora reposicionadas fora do regime de manejo formal. Entretanto, a tendência de longo prazo indica declínio potencial na performance devido à exposição progressiva a pressões antrópicas, como expansão urbana, poluição e fragmentação. Assim, o Cenário 2 demonstra que a remoção de proteção das categorias de uso sustentável não gera ganhos reais de carbono, mas apenas uma reorganização transitória de estoques que tendem a se reduzir ao longo do tempo, enfraquecendo a capacidade regional de mitigação climática.

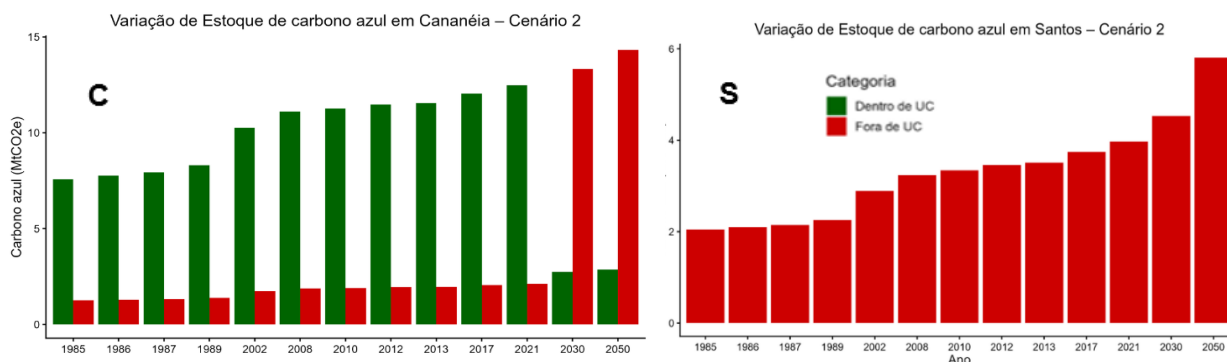


Figura 9. Variação do **estoque** de carbono em Cananéia (C) e Santos (S) até 2050, caso seja retirado 80% dos manguezais pertencentes a unidades de conservação até 2030, conforme as prerrogativas do cenário 2.

Ainda perdendo 80% dos manguezais de suas unidades de conservação Cananéia ainda preservaria maior performance em estoque de carbono (Figura 9) e sequestro também (Figura

10), principalmente por possuir um ecossistema protegido biogeoquimicamente e historicamente preservado, assim, sua transferência de energia é mais acentuada. Essa transição gera um aparente aumento dos estoques “fora” de UC tanto em Cananéia quanto em Santos, mas, assim como no comportamento descrito anteriormente, esse crescimento não representa ganho real de carbono, e sim a migração administrativa de áreas anteriormente estáveis para uma condição mais vulnerável. A energia ecossistêmica, antes concentrada em zonas de maior proteção, passa a compor territórios sujeitos a pressões antrópicas mais intensas, o que tende a reduzir, ao longo do tempo, a performance de retenção de carbono. Assim, embora os valores totais de estoque permaneçam elevados imediatamente após a redistribuição, o Cenário 2 evidencia que a remoção de proteção não adiciona funcionalidade ao sistema, apenas desloca estoques que, fora das UCs, apresentam maior risco de degradação e menor capacidade de sustentar a mitigação climática no longo prazo.

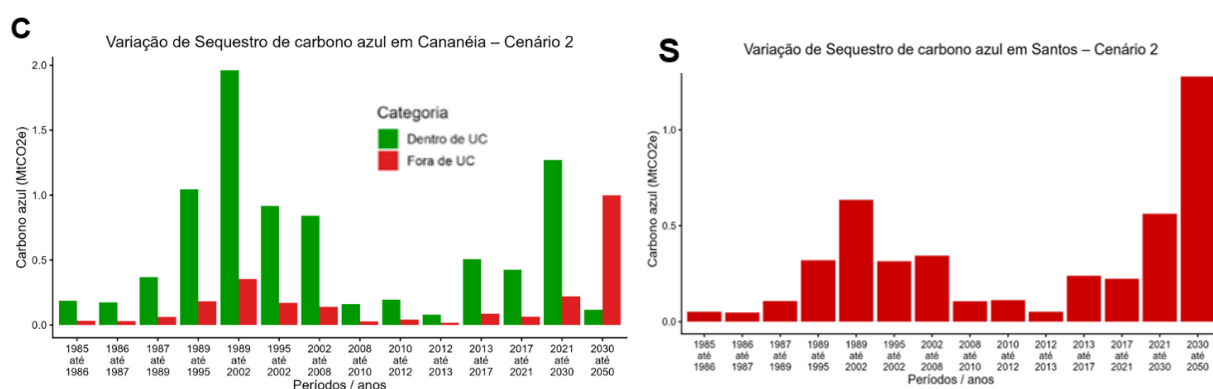


Figura 10. Variação do **sequestro** de carbono em Cananéia e Santos até 2050, caso seja retirado 80% dos manguezais pertencentes a unidades de conservação até 2030, conforme as prerrogativas do cenário 2.

4.2.3 Cenário 3 (Expansão de UCs)

No Cenário 3, que projeta a ampliação do regime de proteção para abarcar todo o remanescente de manguezais a partir de 2030, observa-se um incremento expressivo dos estoques de carbono nas áreas recém-incorporadas à proteção, acompanhado da redução proporcional dos valores classificados como “fora de UC” (Fig. 11). Esse comportamento indica que a ampliação das fronteiras de proteção não apenas mantém o carbono já armazenado, mas potencializa a capacidade de acúmulo, sobretudo após 2030, quando os valores dentro das UCs ultrapassam amplamente os cenários anteriores.

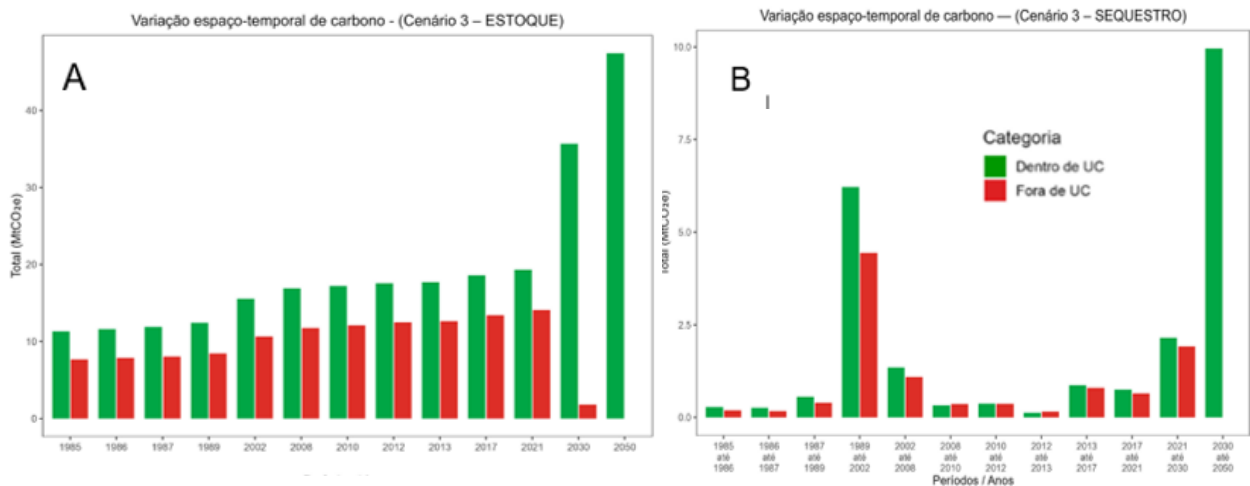


Figura 11. Variação do **estoque** (A) e **sequestro** (B) de carbono dentro de UC (barras verdes) e fora de UC (barras vermelhas) nos parâmetros do cenário 3.

Esse rebatimento espacial indica que a reclassificação para categorias de manejo formal consolida estoques maduros e eleva a estabilidade biogeoquímica dos sítios incorporados, reduzindo a probabilidade de perdas por distúrbios antrópicos. A Figura 11 ainda mostra que o sequestro também se intensifica de forma marcante no intervalo 2030–2050, refletindo o efeito positivo da integridade ecológica e da estabilidade hidrossedimentar conferidas pela proteção integral. Do ponto de vista dinâmico, o sequestro apresenta elevação sustentada no período 2030–2050 dos manguezais, refletindo ganhos de performance associados à maior integridade ecológica, menor perturbação e fragmentação. Esse conjunto de evidências indica que a expansão da proteção legal atua como um catalisador de resiliência ecológica e eficiência biogeoquímica, reduzindo a vulnerabilidade dos manguezais a pressões antrópicas e consolidando sua função como sumidouros duradouros de carbono azul.

Em Cananéia, observa-se uma variação positiva no estoque total após essa transição (Figura 12), associada à conversão das áreas, porém de forma menos expressiva do que em Santos, uma vez que essas áreas já atuam como zonas de amortecimento das atuais Unidades de Conservação. Em Santos, por outro lado, os benefícios da conversão de áreas são ecologicamente mais expressivos. Nesse sentido, o Cenário 3 evidencia que a ampliação da proteção não implica a criação de novo carbono, mas a consolidação da integridade ecossistêmica dos manguezais em um ambiente mais regulado e resiliente, ampliando sua capacidade de manter — e potencialmente aumentar — o estoque de carbono azul frente às mudanças climáticas e à crescente urbanização.

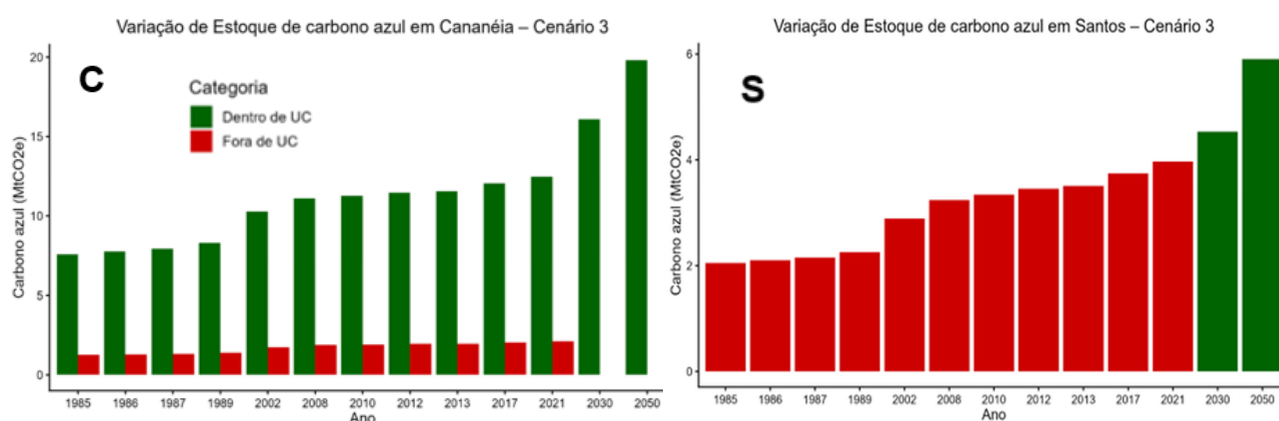


Figura 12. Variação do **estoque** de carbono em Cananéia e Santos até 2050, caso todos os manguezais sejam incluídos em unidades de conservação a partir de 2030, conforme as prerrogativas do cenário 3.

Na figura 13 observa-se um aumento expressivo do sequestro de carbono em ambos os municípios após a mudança de status de proteção, com maior destaque para Santos, que apresenta uma resposta mais acentuada ao longo do tempo. Em Cananéia, os ganhos são mais graduais, refletindo a maior maturidade ecológica dos manguezais locais. Esses resultados indicam que a ampliação das unidades de conservação potencializa o sequestro de carbono, especialmente em áreas previamente mais impactadas, reforçando o papel da proteção formal como estratégia eficaz de mitigação climática.

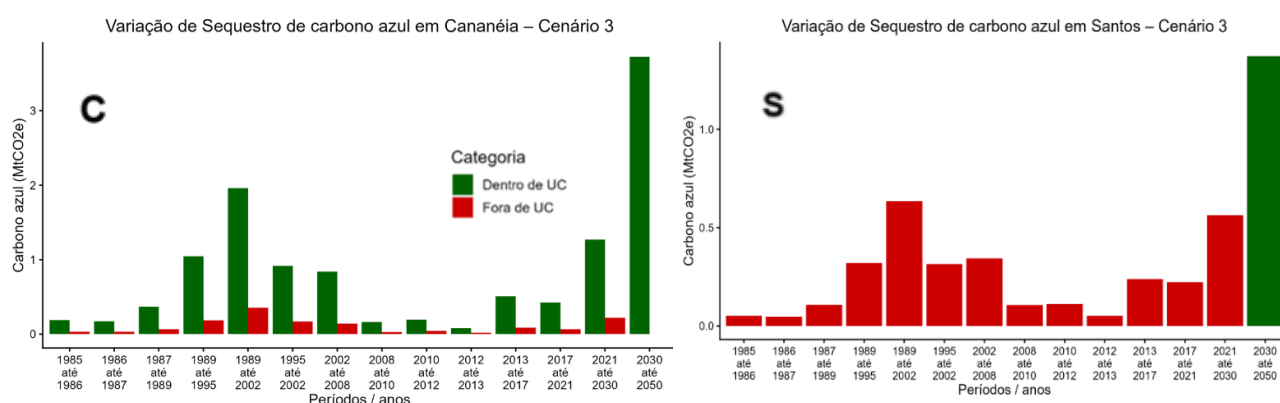


Figura 13. Variação do **sequestro** de carbono em Cananéia e Santos até 2050, caso todos os manguezais sejam incluídos em unidades de conservação a partir de 2030, conforme as prerrogativas do cenário 3.

Embora os resultados referentes aos 12 municípios analisados tenham sido obtidos, optou-se por apresentar neste trabalho apenas os dados dos municípios de Cananéia e Santos, com o objetivo de ilustrar, de forma didática, as diferenças entre manguezais inseridos em unidades de conservação e aqueles localizados fora dessas áreas protegidas. Em trabalhos futuros, incluindo artigos científicos e apresentações acadêmicas, sugere-se incorporar as análises completas de todos os municípios, de modo a oferecer uma visão mais abrangente e detalhada dos padrões de sequestro de carbono nos manguezais da Baixada Santista.

4.2.4. Análises de sensibilidade

Os resultados completos das análises de sensibilidade realizadas para os três cenários simulados encontram-se apresentados nos Apêndices ao final deste trabalho. Para cada cenário, os gráficos mostram a comparação entre o cenário BASE, representado pela linha verde, construído a partir de valores consolidados da literatura, o cenário ALTO (high), indicado pela linha laranja, e o cenário BAIXO, representado pela linha azul. Em todas as figuras, o painel superior corresponde aos manguezais localizados dentro de unidades de conservação, enquanto o painel inferior representa os manguezais situados fora dessas áreas, permitindo a visualização comparativa do comportamento dos estoques de carbono sob diferentes níveis de proteção e parametrização."

5. DISCUSSÃO

Os resultados da análise estatística pelo GLMM indicam que o estoque de carbono no solo apresenta elevada estabilidade temporal, o que justifica a diferença menos acentuada entre áreas protegidas e não protegidas. Esse comportamento é consistente com evidências de que o carbono sedimentar em manguezais sofre variações lentas e está fortemente associado à dinâmica edáfica de longo prazo, mesmo em condições de perturbação moderada (Lovelock et al., 2022). A biomassa aérea, por outro lado, refletiu de forma mais sensível o efeito da proteção, exibindo incremento médio de aproximadamente 23% em áreas incluídas em Unidades de Conservação. Esse padrão está alinhado ao entendimento de que a biomassa é diretamente influenciada pela maturidade estrutural da floresta e pela redução de eventos de mortalidade em ambientes mais preservados, conforme documentado em análises regionais brasileiras (GOMES et al., 2019).

Os resultados obtidos evidenciam que os manguezais da Região Metropolitana da Baixada Santista (RMBS) possuem elevado potencial como sumidouros de carbono, reforçando a importância desses ecossistemas na mitigação climática regional e nacional. Além de mitigar emissões, manguezais atuam como barreiras naturais, reduzindo erosão e impactos climáticos extremos, configurando cobenefícios diretos para adaptação costeira (Friess et al., 2020; Menéndez et al., 2020). A modelagem espacial e temporal demonstrou que as áreas sob proteção legal mantêm maiores valores de estoque e sequestro de carbono, confirmando que o grau de conservação exerce influência direta sobre a estabilidade biogeoquímica dos manguezais. Esse padrão está em consonância com estudos que identificam o Brasil como um dos principais hotspots globais de carbono azul, responsável por aproximadamente 8,5% dos estoques mundiais e cerca de 13,5% do sequestro anual de carbono em manguezais (Rovai et al., 2022).

De forma geral, observou-se que o Estoque de Carbono, que representa a quantificação da massa total de carbono retido nos três principais reservatórios do ecossistema, isto é, Biomassa, Serrapilheira e, sobretudo, o Solo, apresenta maior estabilidade espacial e temporal. Essa estabilidade reflete a natureza sedimentar e o acúmulo de matéria orgânica sob condições

anóxicas, característica amplamente documentada na literatura, que atribui ao compartimento edáfico entre 70% e 85% do total de carbono retido em ecossistemas de mangue (Beloto et al., 2023). A menor variabilidade desse compartimento reforça a sua função como reservatório de longo prazo, pouco suscetível a flutuações anuais, desde que a integridade estrutural e hidrológica do ecossistema seja mantida. Em contrapartida, o Sequestro de Carbono, a taxa líquida de acúmulo anual nos reservatórios (Natural Capital Project, 2022), com maior foco no acúmulo na biomassa viva como o componente de fluxo mais dinâmico, mostrou-se mais sensível às variações locais. A taxa de sequestro foi fortemente influenciada pelo estágio sucessional e pela maturidade ecológica dos bosques, de modo que manguezais mais maduros, como os de Cananéia, apresentaram comportamento mais estável e valores superiores de sequestro, enquanto áreas mais impactadas, como Santos, exibiram maior variabilidade, condizente com as interferências antrópicas e a fragmentação espacial (Rovai et al., 2021; Gomes et al., 2021).

Essa diferença entre os compartimentos e estágios de maturidade pode ser interpretada à luz dos processos ecológicos que sustentam o acúmulo e a estabilidade do carbono (Lovelock, 2020). Manguezais jovens e em expansão geralmente apresentam altas taxas iniciais de fixação de carbono devido à rápida colonização e crescimento vegetativo; contudo, essa dinâmica tende a se estabilizar à medida que o sistema amadurece e as taxas de deposição e decomposição atingem equilíbrio (Alongi, 2014; Beloto et al., 2023). Assim, quanto mais consolidado o manguezal, maior sua resiliência funcional frente a distúrbios e menor a volatilidade dos fluxos de carbono, o que explica o comportamento mais previsível dos valores simulados nos cenários de manutenção e expansão da proteção.

Sob o **Cenário 1 (Tendência Atual)**, os resultados indicam manutenção dos estoques de carbono azul até 2030, com leve acréscimo projetado, refletindo a estabilidade da cobertura vegetal e a continuidade dos processos ecológicos de acúmulo nos manguezais da Baixada Santista. Ao longo de toda a série temporal (1985–2030), as áreas inseridas em Unidades de Conservação apresentaram estoques consistentemente superiores, evidenciando maior resiliência estrutural e menor suscetibilidade à perda de carbono, um padrão compatível com o observado em regiões menos urbanizadas e mais preservadas, como o Sistema Estuarino-Lagunar de Cananéia-Iguape (Schaeffer-Novelli, 2025), e coerente com análises regionais que destacam a influência da integridade ambiental na estabilidade biogeoquímica dos manguezais (Rosa, 2024). Em contraste, áreas fora de UCs apresentaram valores menores, porém com tendência positiva moderada, sugerindo estabilidade relativa mesmo em zonas submetidas a maior pressão antrópica. De forma geral, os resultados indicam que, mantidas as condições atuais de manejo, os manguezais da região tendem a conservar sua função como sumidouros de carbono, ainda que sua estabilidade dependa da continuidade das políticas de conservação e do controle das pressões urbanas historicamente documentadas na RMBS (Moschetto et al., 2021).

No **Cenário 2 (Perda de Conservação)**, entretanto, a retirada das categorias IV, V e VI, equivalentes a aproximadamente 80% das UCs regionais, majoritariamente compostas por

Áreas de Proteção Ambiental (APAs), Reservas de Desenvolvimento Sustentável (RDS) e Reservas Extrativistas (RESEX), provocou redistribuição do carbono anteriormente estocado dentro das UCs para áreas externas. Embora, num primeiro momento, esses manguezais mantenham altas taxas de sequestro devido à inércia ecológica das áreas que antes estavam protegidas, a tendência de longo prazo indica declínio na eficiência biogeoquímica em razão da exposição crescente a pressões antrópicas, como expansão urbana e poluição (Gomes et al., 2021). Essa transferência temporária de desempenho para áreas não protegidas sugere que a proteção legal não apenas delimita território, mas sustenta a integridade ecológica e a capacidade funcional dos manguezais como sumidouros de carbono azul.

Por sua vez, o **Cenário 3 (expansão das UCs)** evidenciou incremento expressivo nos estoques e sequestro de carbono após 2030, especialmente nas áreas recém-incorporadas à proteção. Esse resultado confirma que a ampliação de zonas legalmente protegidas atua como um mecanismo de mitigação climática efetivo, promovendo a recuperação estrutural dos bosques e o aumento progressivo do carbono retido na biomassa e no solo (Beloto et al., 2023; Rovai et al., 2022). A convergência dos resultados observados neste cenário com as evidências apresentadas por Moritsch et al. (2021) e Kauffman (2018) reforça que políticas voltadas à restauração e conservação dos ecossistemas costeiros amplificam significativamente a capacidade de sequestro e reduzem a vulnerabilidade das zonas costeiras aos impactos climáticos.

A análise dos três cenários revela que a manutenção e a expansão das UCs representam estratégias indispensáveis para garantir a estabilidade dos serviços ecossistêmicos de mitigação prestados pelos manguezais. Em contraste, a perda de proteção tende a gerar declínio cumulativo e irreversível no balanço de carbono, uma vez que a degradação dos sedimentos pode liberar estoques acumulados ao longo de séculos (Gomes et al., 2021). Tais achados corroboram a literatura nacional e internacional, que reconhece a proteção formal como o fator mais determinante na manutenção dos estoques de carbono e na resiliência ecológica dos manguezais (Rovai et al., 2022; Beloto et al., 2023).

Para as **análises de sensibilidade** temos que as curvas dos cenários BASE, LOW e HIGH apresentaram trajetórias muito semelhantes ao longo de todo o período analisado. Essa proximidade indica que o modelo Coastal Blue Carbon possui baixa sensibilidade às variações impostas nos parâmetros de sequestro, sugerindo que as tendências gerais de acúmulo de carbono são estáveis e robustas, independentemente das incertezas biofísicas consideradas. Assim, as conclusões referentes à superioridade dos estoques dentro de Unidades de Conservação, bem como à maior estabilidade temporal nesses ambientes, não dependem de um conjunto específico de parâmetros, reforçando a confiabilidade dos resultados.

Por fim, destaca-se que a ausência de medições locais diretas ainda limita a calibração precisa dos modelos, especialmente no que tange às taxas de sequestro específicas por idade e estrutura dos manguezais. Estudos futuros voltados à quantificação de carbono no solo e na biomassa, aliados a séries temporais de monitoramento, são fundamentais para aprimorar as modelagens

espaciais e fortalecer as bases de políticas de mitigação e compensação baseadas em ecossistemas. Além disso, avaliar a capacidade de sequestro e estoque de carbono em unidades de conservação de proteção integral e de uso sustentável representa uma oportunidade estratégica para aprimorar o ordenamento e a eficácia das ações de conservação desses ecossistemas.

6. CONCLUSÃO

A modelagem espacial e temporal do carbono azul na Região Metropolitana da Baixada Santista demonstrou que a dinâmica de estoque e sequestro de carbono nos manguezais está relacionada ao grau de conservação e ao contexto de uso e ocupação do solo. Os resultados evidenciam que manguezais inseridos em Unidades de Conservação apresentam maior estabilidade funcional, maior eficiência biogeoquímica e estoques de carbono do solo significativamente superiores quando comparados às áreas não protegidas. Em contraste, manguezais expostos à urbanização, fragmentação e outras pressões antrópicas tendem a apresentar maior variabilidade temporal, menor eficiência de acúmulo e maior vulnerabilidade à perda de carbono já armazenado.

A comparação entre áreas protegidas e não protegidas indica que a proteção legal proporciona as condições estruturais necessárias para que os manguezais mantenham elevados estoques de carbono e estabilidade funcional, com destaque para o carbono sedimentar de longa permanência. Ao mesmo tempo, a restauração ecológica se apresenta como ferramenta estratégica para recuperar funções ecológicas comprometidas, reduzir a fragmentação e promover maior resiliência frente às pressões antrópicas. Diante desse cenário, a consolidação de estratégias de conservação e restauração deixa de ser apenas uma demanda ecológica e passa a constituir uma base técnica imprescindível para o planejamento ambiental e climático da região.

Os resultados deste estudo oferecem subsídios diretos para o fortalecimento das políticas públicas de mitigação e adaptação climática no litoral paulista, destacando a Baixada Santista como território estratégico para a conservação de manguezais. As evidências apresentadas dialogam com instrumentos já existentes, como o Plano Estadual de Adaptação e Resiliência Climática (PEARC), o Plano Estadual de Ação Climática de São Paulo, Programa de Gestão Integrada de Manguezais do estado de São Paulo, e iniciativas locais como Plano Municipal de Ação Climática de Santos (PACS), contribuindo para qualificar o planejamento regional e integrar ações de conservação, manejo e ordenamento costeiro. O estudo também se alinha às diretrizes do Plano São Vicente 500 anos e ao projeto Coop Clima, que incorpora perspectivas de justiça climática ao discutir formas de enfrentar as desigualdades sociais acentuadas pelos impactos das mudanças do clima. Juntos, esses instrumentos encontram nos resultados deste trabalho uma base técnica capaz de orientar decisões e ampliar a efetividade das políticas locais.

Ao preencher lacunas sobre a dinâmica do carbono azul no litoral paulista e evidenciar diferenças associadas ao estado de conservação dos manguezais, este estudo reforça seu valor regional e a importância dos manguezais como infraestrutura natural essencial. A pesquisa também aponta a necessidade de expandir estudos que integrem medições diretas de biomassa, carbono sedimentar e modelagens preditivas, consolidando a Baixada Santista como área prioritária para políticas estaduais e municipais voltadas à conservação, adaptação climática e justiça socioambiental.

7. REFERÊNCIAS

- ABREU, C. *Zonas costeiras e oceanos no Brasil: gestão e desafios*. São Paulo: Editora Senac, 2015.
- ABREU, J. G. de. *Gestão costeira integrada: o desafio da integração institucional no Brasil*. Rio de Janeiro: IBAMA, 2015.
- ALESP – Assembleia Legislativa do Estado de São Paulo. *Perfil socioeconômico da Região Metropolitana da Baixada Santista*. São Paulo: ALESP, 2008.
- ALONGI, D. M. *Mangrove forests: resilience, protection from tsunamis, and responses to global climate change*. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v. 76, n. 1, p. 1–13, 2008.
- ALONGI, D. M. *The role of mangroves in carbon sequestration and storage*. *Forest Ecology and Management*, v. 318, p. 1–9, 2014.
- ALONGI, D. M. *Global significance of mangrove blue carbon ecosystems*. *Science of the Total Environment*, v. 806, p. 150–202, 2022.
- BELÓTO, A. F. et al. Blue carbon stocks and fluxes in Brazilian mangroves: spatial patterns, controlling factors, and implications for conservation. *Marine Ecology Progress Series*, v. 721, p. 45–62, 2023.
- BERTRAM, C. et al. Climate change and the ocean: what role for adaptation? *Marine Policy*, v. 131, p. 104637, 2021.
- BOUILLON, S. et al. Mangrove production and carbon sinks: a revision of global budget estimates. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 22, n. 2, p. 1–12, 2008.
- BRASIL. *Constituição da República Federativa do Brasil de 1988*. Brasília, DF: Senado Federal, 1988.
- BRASIL. Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000. Institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 2000b.
- BRASIL. Decreto nº 5.300, de 7 de dezembro de 2004. Regulamenta a Lei nº 7.661/1988. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 2004.
- BRASIL. Decreto nº 5.758, de 13 de abril de 2006. Institui o Plano Nacional de Áreas Protegidas. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 2006.
- BRYAN-BROWN, D. N. et al. Global trends in mangrove forest fragmentation. *Scientific Reports*, v. 10, n. 1, p. 7117, 2020.
- BUNTING, P. et al. The Global Mangrove Watch — a new 2010 global baseline of mangrove extent. *Remote Sensing*, v. 10, n. 10, p. 1669, 2018.
- BUNTING, P.; ROSENQVIST, A.; HILARIDES, L.; LUCAS, R. M.; THOMAS, N.; TADONO, T.; WORTHINGTON, T. A.; SPALDING, M.; MURRAY, N. J.; REBELO, L.-M. Global Mangrove Extent Change 1996–2020: Global Mangrove Watch Version 3.0. *Remote Sens.*, 2022, 14, 3657.
- CASSIANO, L. A. et al. Pagamento por serviços ambientais: uma alternativa para a preservação das áreas de mangue do estuário do Rio Paraíba. *Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, v. 6, n. 2, p. 155–170, 2017.
- CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. *Relatório de Qualidade Ambiental: Litoral do Estado de São Paulo 2021*. São Paulo: CETESB, 2021.
- CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 303, de 20 de março de 2002. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 2002b.
- COSTANZA, R. et al. Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*, v. 26, p. 152–158, 2014.
- DINIZ, F. C. et al. Monitoring Brazilian coastal wetlands: long-term changes in mangrove extent from 1985 to 2018. *Remote Sensing of Environment*, v. 232, p. 111302, 2019.

- DONATO, D. C. et al. Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics. *Nature Geoscience*, v. 4, p. 293–297, 2011.
- ELLISON, A. M. et al. Managing mangroves with benthic biodiversity in mind: moving beyond roving banditry. *Ecological Applications*, v. 15, n. 1, p. 215–225, 2005.
- EWERS LEWIS, C. J.; CARNELL, P. E.; SANDERMAN, J.; BALDOCK, J. A.; MACREADIE, P. I. Variability and Vulnerability of Coastal “Blue Carbon” Stocks: A Case Study from Southeast Australia. *Ecosystems*, 21, 263–247, 2018.
- FRIESS, D. A. et al. Mangrove blue carbon in climate change mitigation and adaptation: science and policy framework. *Frontiers in Marine Science*, v. 7, p. 1–16, 2020.
- FUNDAÇÃO FLORESTAL. *Plano de Manejo do Parque Estadual Restinga de Bertiooga*. São Paulo: Fundação Florestal, 2010.
- GALVANI, E.; LIMA, N. G. *Clima e planejamento urbano na Baixada Santista*. São Paulo: Edusp, 2011.
- GATTI, L. V. et al. Amazonia as a carbon source linked to deforestation and climate change. *Nature*, v. 595, p. 388–393, 2021.
- GATTUSO, J. P. et al. Ocean solutions to address climate change and its effects on marine ecosystems. *Frontiers in Marine Science*, v. 5, p. 337, 2018.
- GLOBAL MANGROVE ALLIANCE. *The state of the world’s mangroves 2022*. GMA Report, 2022.
- GOMES, L. E. O. et al. Carbon loss and mangrove mortality in Brazil: consequences of anthropogenic pressure and climate anomalies. *Frontiers in Marine Science*, v. 8, p. 737114, 2021.
- HAMILTON, S. E.; CASEY, D. Global assessment of mangrove extent and loss through remote sensing. *Global Ecology and Biogeography*, v. 25, n. 6, p. 729–738, 2016.
- HAMILTON, S. E.; FRIESS, D. A. Global carbon stocks and potential emissions due to mangrove deforestation from 2000 to 2012. *Nature Climate Change*, v. 8, p. 240–244, 2018.
- HARTIG, F. *DHARMA: Residual Diagnostics for Hierarchical (Multi-Level / Mixed) Regression Models*. Version 0.3.2.0, 2020.
- HERNANGÓMEZ, D. Using the tidyverse with terra objects: the tidyterra package. *Journal of Open Source Software*, v. 8, n. 90, p. 5751, 2023.
- HIMES-CORNELL, A. et al. Global and regional drivers of mangrove loss and vulnerability. *Environmental Research Letters*, v. 13, n. 3, p. 034037, 2018.
- HIJMANS, R. J. et al. *terra: Spatial Data Analysis*. Version 1.8-80, 2025.
- HOEGH-GULDBERG, O. et al. The ocean as a solution to climate change: five opportunities for action. Washington, D.C.: World Resources Institute, 2019.
- HOWARD, J. et al. Clarifying the role of coastal and marine systems in climate mitigation. *Frontiers in Ecology and the Environment*, v. 15, n. 1, p. 42–50, 2017.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Mapa de Vegetação do Brasil*. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Malha municipal e bases cartográficas*. Rio de Janeiro: IBGE, 2022.
- ICMBIO – Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. *Livro Vermelho dos Manguezais do Brasil*. Brasília: ICMBio, 2018.
- ICMBIO – Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. Cadastro Nacional de Unidades de Conservação (CNUC). Brasília: MMA, 2023.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*. Geneva: IPCC, 2019.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Geneva: IPCC, 2019b.

- JÄNES, H. et al. Stable isotopes infer the value of Australia's coastal vegetated ecosystems from fisheries. *Fish Fish.*, 2020a.
- JÄNES, H. et al. Quantifying fisheries enhancement from coastal vegetated ecosystems. *Ecosyst.Serv.*, 2020b.
- KAUFFMAN, J. B. et al. Carbon stocks of intact mangroves and carbon emissions arising from their conversion in the Dominican Republic. *Ecological Applications*, v. 30, n. 5, p. 1–17, 2020.
- KIRWAN, M. L. et al. Limits on the adaptability of coastal marshes to rising sea level. *Geophysical Research Letters*, v. 37, n. 23, p. L23401, 2010.
- LACERDA, L. D. de et al. Coastal zone and mangrove management in Brazil. *Journal of Coastal Research*, v. 35, n. 4, p. 753–760, 2019.
- LEAL, R. et al. Human impacts on global mangrove loss 2010–2020. *Science Advances*, v. 8, n. 36, p. eabn8821, 2022.
- LOVELOCK, C. E. et al. The vulnerability of Indo-Pacific mangrove forests to sea-level rise. *Nature*, v. 526, p. 559–563, 2017.
- LOVELOCK, C. E.; REEF, R. Variable impacts of climate change on blue carbon. *Nature Geoscience*, v. 13, p. 1–8, 2020.
- LOVELOCK, C. E. et al. Blue carbon accumulation with restoration of mangroves. *Nature Communications*, v. 13, 2022.
- MACLEAN, D. R. *Bioinformatics cookbook*. 2. ed. Birmingham, UK: Packt Publishing, 2023.
- MCLEOD, E. et al. A blueprint for blue carbon. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2011.
- MENÉNDEZ, P. et al. The global flood protection benefits of mangroves. *Scientific Reports*, v. 10, p. 4404, 2020.
- MMA – Ministério do Meio Ambiente. *Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro (PNGC II)*. Brasília: MMA, 2015.
- MMA – Ministério do Meio Ambiente. *Sítios Ramsar brasileiros*. Brasília: MMA, 2023.
- MOSCHETTO, F. A. et al. Urban expansion and environmental vulnerability in the Baixada Santista. *Journal of Coastal Conservation*, v. 25, n. 38, p. 1–14, 2021.
- MOSCHETTO, F. A.; RIBEIRO, R. B.; FREITAS, D. M. Urban expansion, regeneration and socioenvironmental vulnerability in a mangrove ecosystem. *Ocean & Coastal Management*, v. 200, p. 105418, 2021.
- MPSP – Ministério Público do Estado de São Paulo. *Relatório de vulnerabilidade socioambiental da Baixada Santista*. São Paulo: MPSP, 2023.
- NATURAL CAPITAL PROJECT. *InVEST User's Guide – Coastal Blue Carbon Model*. Version 3.13. Stanford University, 2022.
- NELLEMANN, C. et al. *Blue carbon: the role of healthy oceans in binding carbon*. UNEP, 2009.
- O'CONNOR, J. et al. Loss of coastal ecosystems causes rapid release of stored carbon. *Global Change Biology*, v. 25, n. 11, p. 3927–3940, 2019.
- PASCHOALON, I. *Vulnerabilidade territorial dos manguezais do Estado de São Paulo*. Dissertação, USP/ESALQ, 2024.
- PEDROZA-FILHO, M. X. et al. The economic relevance of Brazilian mangroves in aquaculture and fisheries. *Marine Policy*, v. 151, 2023.
- PÉBESMA, E. Simple features for R: standardized support for spatial vector data. *The R Journal*, v. 10, n. 1, 2018.
- PENDLETON, L. et al. Estimating global “blue carbon” emissions. *PLoS ONE*, v. 7, n. 9, p. e43542, 2012.
- PÉREZ, A. et al. Carbon sequestration and greenhouse gas emissions in mangrove forests. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 31, n. 2, 2017.
- PMMA SANTOS. *Plano Municipal de Meio Ambiente*. Santos: PMS, 2021.
- QGIS DEVELOPMENT TEAM. *QGIS Geographic Information System*. Version 3.30.1, 2023.

- R CORE TEAM. *R: A language and environment for statistical computing*. Vienna: R Foundation, 2023.
- R CORE TEAM (2025). *R: A Language and Environment for Statistical Computing.*, 2025.
- RAMSAR CONVENTION SECRETARIAT. *The Ramsar Convention Manual*. 6th ed. Gland, 2013.
- RODRÍGUEZ-RODRÍGUEZ, A. et al. Current trends and future directions for integrating social values into mangrove restoration. *Restoration Ecology*, 2025.
- ROGERS, K. How will climate change impact mangrove forests? *Science of the Total Environment*, v. 772, p. 145–162, 2021.
- ROSA, A. C. et al. Carbon stocks and fluxes in urban mangroves of southeastern Brazil. *Ocean and Coastal Management*, v. 227, p. 106304, 2022.
- ROVAI, A. S. et al. Global controls on carbon storage in mangrove soils. *Nature Climate Change*, v. 11, n. 5, p. 439–444, 2021.
- ROVAI, A. S. et al. Mangrove carbon stocks in the Cananéia–Iguape coastal system. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v. 255, p. 107–118, 2022.
- SANTOS, M. F.; FURLAN, S. A. Urbanização e vulnerabilidade ambiental na Baixada Santista. *Revista Geográfica de São Paulo*, v. 12, p. 43–62, 2010.
- SCHAEFFER-NOVELLI, Y. et al. Brazilian mangrove forests: structure, function, and anthropogenic impacts. *Aquatic Conservation*, v. 26, 2016.
- SCHAEFFER-NOVELLI, Y.; COELHO-JR, C.; ALMEIDA, R. de et al. Manguezais na Ilha do Cardoso. *Hoehnea*, v. 52, 2025.
- SEMIL – Secretaria do Meio Ambiente. *Compromisso SP Carbono Zero*. São Paulo: SEMIL, 2023.
- SEMIL; GIZ. *Plano Estadual de Adaptação e Resiliência Climática (PEARC)*. São Paulo: Governo do Estado, 2025.
- SERVINO, R. N. et al. Fisheries and ecosystem services of Brazilian mangroves. *Journal of Coastal Research*, v. 85, p. 1236–1244, 2018.
- SAYRE, R. et al. A new 30-m global shoreline vector. *Journal of Operational Oceanography*, 2018.
- SOARES, M. L. G. et al. Blue carbon and climate change mitigation: challenges and opportunities in Brazil. *Frontiers in Marine Science*, v. 9, 2022.
- STEFFEN, W. et al. Trajectories of the Earth System in the Anthropocene. *PNAS*, v. 115, n. 33, p. 8252–8259, 2018.
- TAILLARDAT, P. et al. Climate change mitigation potential of estuarine and coastal blue carbon ecosystems. *Global Change Biology*, v. 24, 2018.
- UNEP – United Nations Environment Programme. *Ocean-based climate solutions*. Nairobi: UNEP, 2022.
- UNEP-WCMC; IUCN. *Protected Planet: The World Database on Protected Areas (WDPA)*. 2025.
- WICKHAM, H. *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag, 2016.

APÊNDICE

APÊNCIDE 1 – Resultados da análise de sensibilidade da modelagem da dinâmica de carbono azul ente diferentes contextos de conservação

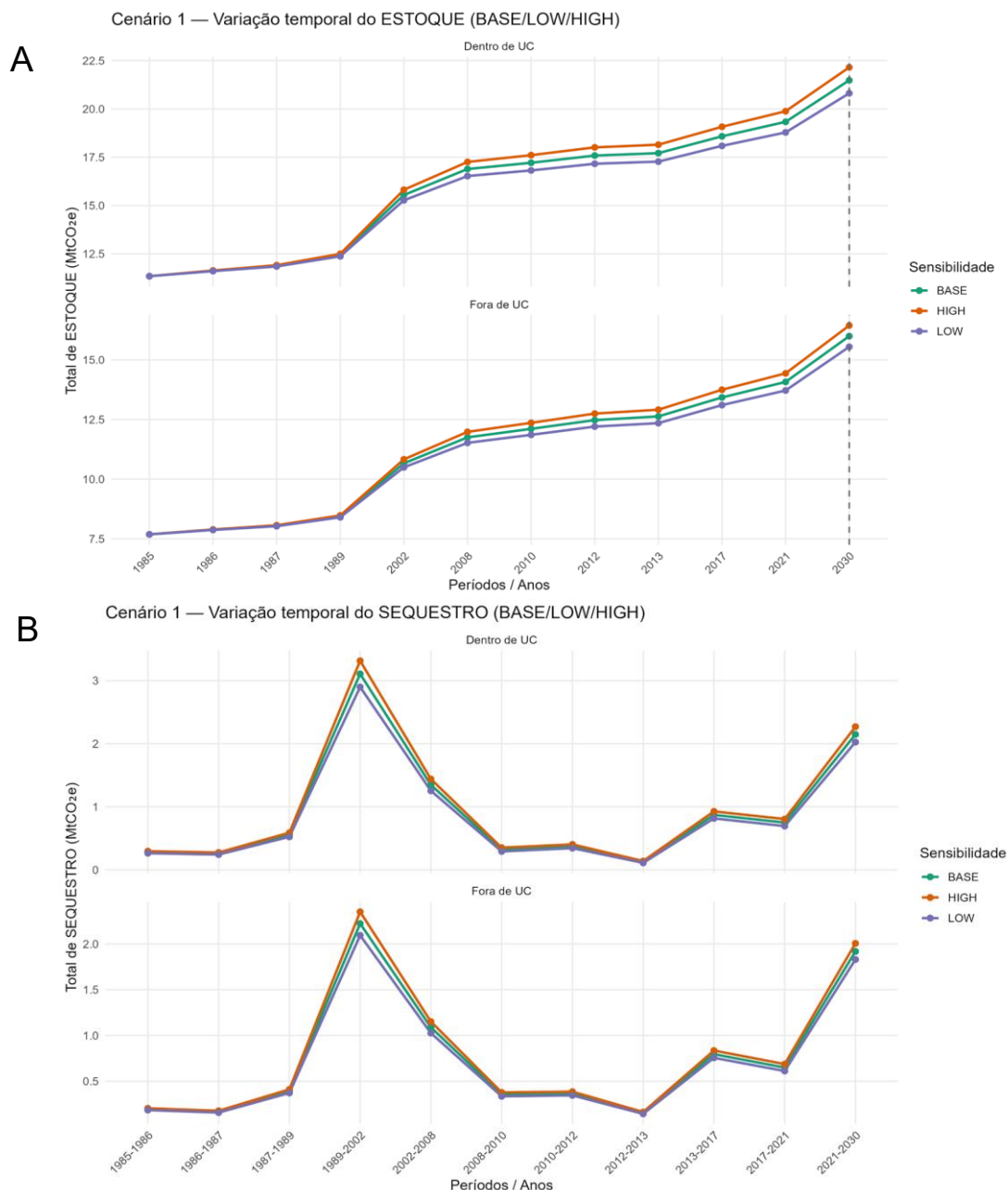


Figura A1. Gráfico representando estoque (A) e sequestro (B) através dos anos. A linha verde é o cenário BASE com valores da literatura. A linha laranja é o cenário ALTO (high) da análise de sensibilidade, enquanto a linha azul representa o cenário (BAIXO). O gráfico da parte superior da figura representa os manguezais dentro de UC e o gráfico de baixo os manguezais de Fora da UC.

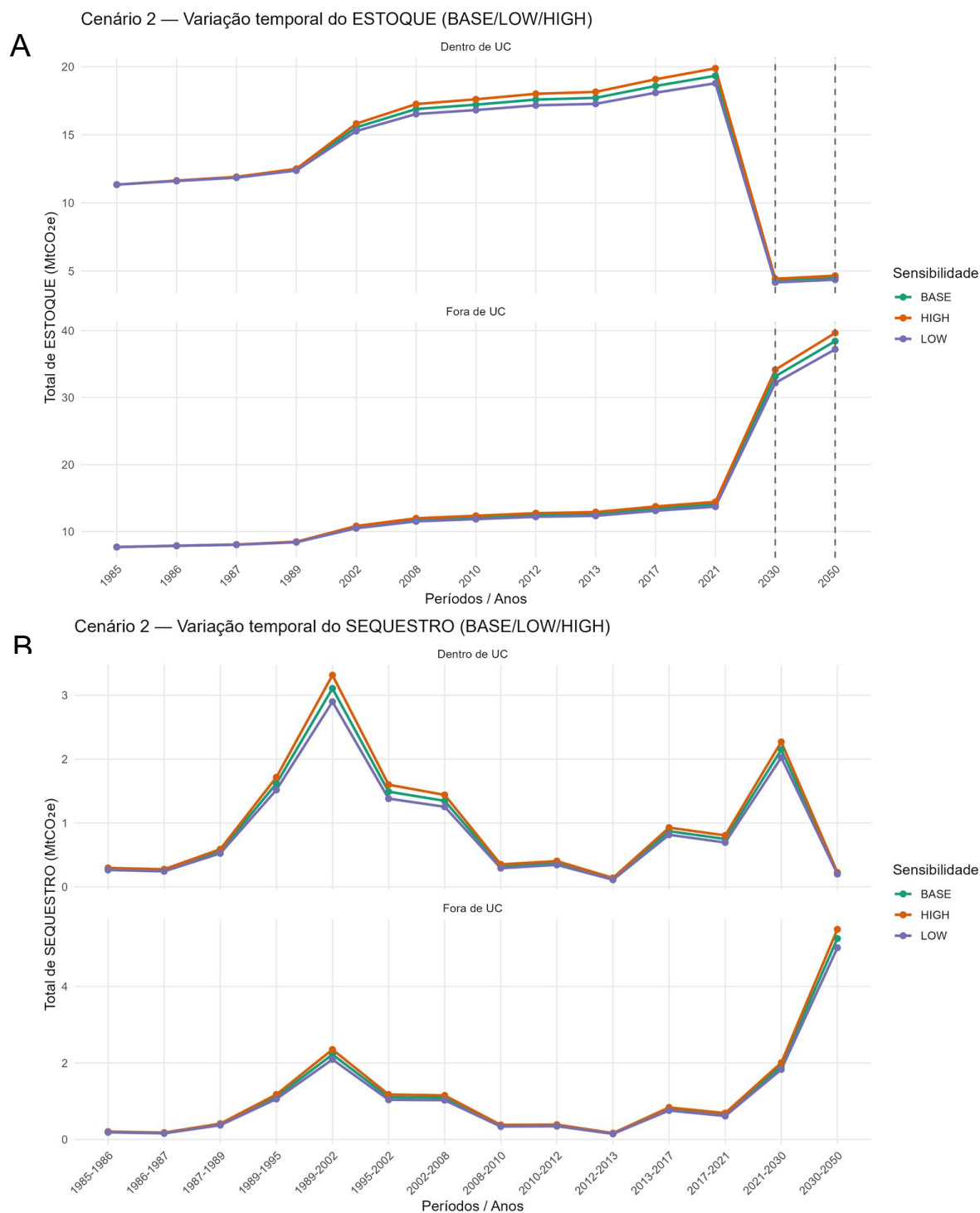


Figura A2. Gráfico representando estoque (A) e sequestro (B) através dos anos no cenário 2. A linha verde é o cenário BASE com valores da literatura. A linha laranja é o cenário ALTO (high) da análise de sensibilidade, enquanto a linha azul representa o cenário (BAIXO). O gráfico da parte superior da figura representa os manguezais dentro de UC e o gráfico de baixo os manguezais de fora da UC.

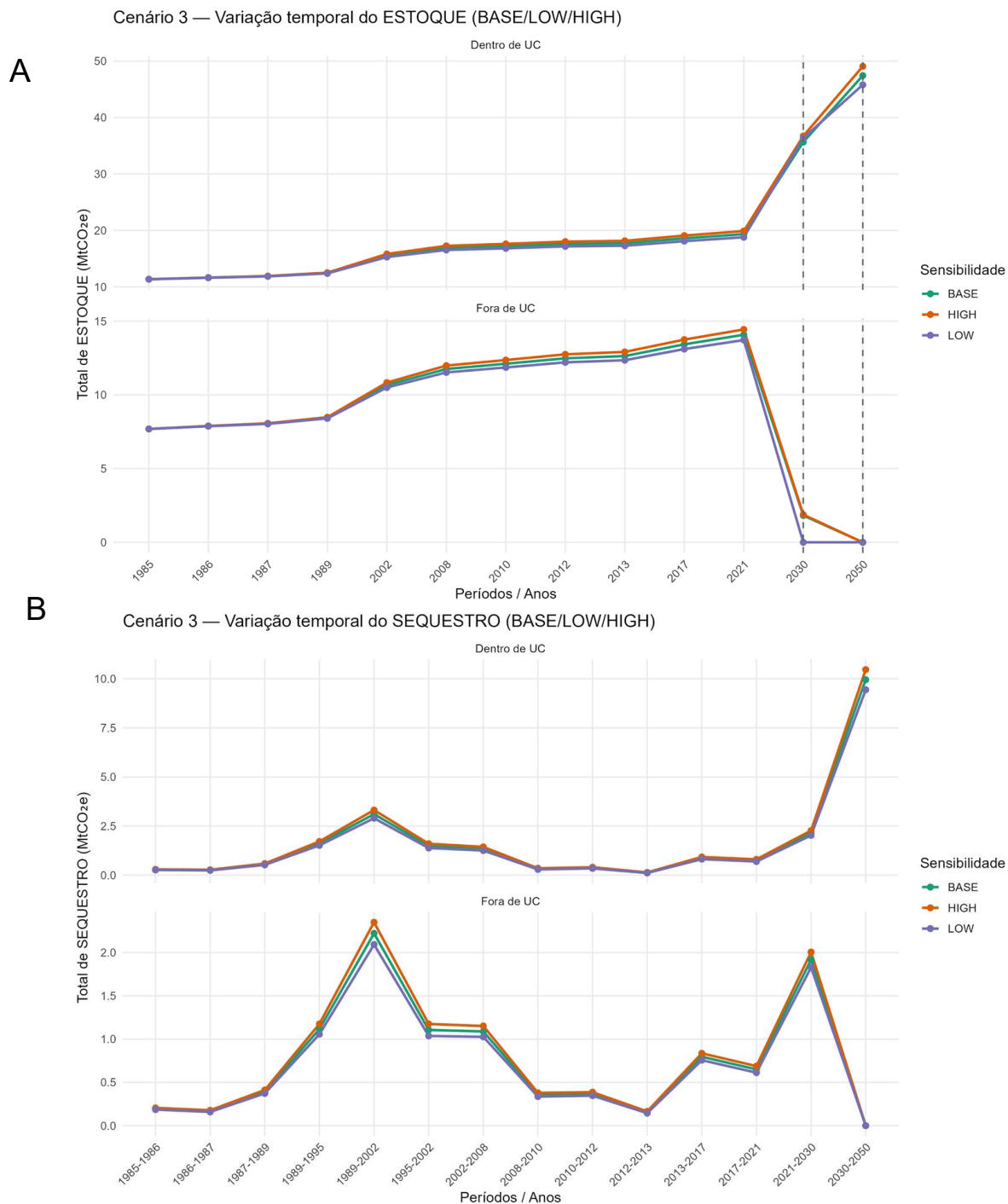


Figure A3. Gráfico representando estoque (A) e sequestro (B) através dos anos no cenário 3. A linha verde é o cenário BASE com valores da literatura. A linha laranja é o cenário ALTO (high) da análise de sensibilidade, enquanto a linha azul representa o cenário (BAIXO). O gráfico da parte superior da figura representa os manguezais dentro de UC e o gráfico de baixo os manguezais de fora da UC.

PARECER FINAL DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Discente: BRENDA SILVA DOS REIS

Título: "Avaliação do Sequestro de Carbono nos Manguezais da Baixada Santista em Diferentes Contextos de Conservação"

Orientador: Profa. Dra. Débora Martins de Freitas

Curso/Habilitação: Bacharelado em Ciências Biológicas/Biologia Marinha

COMISSÃO EXAMINADORA	CONCEITO
Profa. Dra. Débora Martins de Freitas	APROVADA
Prof. Dr. Pedro Henrique Campello Torres	APROVADO

PARECER:

TRABALHO APRESENTADO COM MÉRITO PARA CONCLUSÃO DE CURSO. DISCENTE SE COMPROMETE A ENTREGAR A VERSÃO FINAL CORRIGIDA DE ACORDO COM SUGESTÕES DA BANCA DENTRO DO PRAZO ESTIPULADO.

CONCEITO FINAL:

A Comissão Examinadora abaixo assinada conclui que a discente **Brenda Silva dos Reis** obteve o seguinte conceito:



☒ APROVADO



☐ REPROVADO

São Vicente, 08 de dezembro de 2025.

Profa. Dra. Débora Martins de Freitas

Prof. Dr. Pedro Henrique Campello Torres